

**НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ УКРАЇНИ  
«КИЇВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ  
імені ІГОРЯ СІКОРСЬКОГО»**

Факультет електроніки  
(повна назва інституту/факультету)

Кафедра мікроелектроніки  
(повна назва кафедри)

«До захисту допущено»  
В.о. завідувача кафедри

\_\_\_\_\_ А.Т. Орлов  
(підпис) (ініціали, прізвище)

“ \_\_\_\_ ” \_\_\_\_\_ 2020 р.

**Дипломна робота**  
**на здобуття ступеня бакалавра**

за спеціальністю 153 Мікро-та наносистемна техніка  
(код і назва)

на тему: Наддовгі волоконно-оптичні лінії зв'язку з використанням оптичних підсилювачів на легованому ербієм волокні

Виконав: студент 4 курсу, групи ДП-62  
(шифр групи)

Воровський Віктор Володимирович  
(прізвище, ім'я, по батькові)

\_\_\_\_\_ (підпис)

Керівник Якименко Юрій Іванович, професор  
(посада, науковий ступінь, вчене звання, прізвище та ініціали)

\_\_\_\_\_ (підпис)

Консультант з нормоконтролю доц., к.ф.-м.н., с.н.с. Георгій Свєчніков

Консультант з інформаційних питань доц., к.т.н., Юрій Діденко

Рецензент к.т.н. Володимир Галаган

(посада, науковий ступінь, вчене звання, прізвище та ініціали)

\_\_\_\_\_ (підпис)

Засвідчую, що у цій дипломній роботі немає  
запозичень з праць інших авторів без  
відповідних посилань.

Студент \_\_\_\_\_  
(підпис)

Київ – 2020 рік

**Національний технічний університет України  
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»**

*Факультет електроніки*

(повна назва)

*Кафедра мікроелектроніки*

(повна назва)

Рівень вищої освіти – перший (бакалаврський)

Спеціальність 153 «Мікро- та наносистемна техніка»

(код і назва)

ЗАТВЕРДЖУЮ

В.о. завідувача кафедри

А.Т. Орлов

(підпис)

(ініціали, прізвище)

“ ” \_\_\_\_\_ 2020 р.

### ЗАВДАННЯ

#### на дипломну роботу студенту

Студент групи ДП-62 **Воровський Віктор Володимирович**

(група, прізвище, ім'я, по батькові)

- Тема роботи: **Наддовгі волоконно-оптичні лінії зв'язку з використанням оптичних підсилювачів на легованому ербієм волокні**

Керівник роботи: **Якименко Юрій Іванович, професор**

(прізвище, ім'я, по батькові, науковий ступінь, вчене звання)

затверджені наказом по університету від «\_\_\_\_\_» \_\_\_\_\_ 20\_\_ р. № \_\_\_\_\_

- Термін подання студентом роботи: **04 червня 2020 р.**
- Вихідні дані роботи: карта оптичних кабелів і необслуговуваних регенераційних пунктів по Україні, типові компоненти системи ВОЛЗ.
- Перелік питань, які мають бути розроблені (зміст роботи)
  - Пошук та ознайомлення з літературними джерелами за темою практики.
  - Аналіз поточного стану ринку обладнання для волоконно-оптичних ліній зв'язку ВОЛЗ.
  - Аналіз характеристик волокна, підсилювачів, детекторів та випромінювачів.
  - Проектування ВОЛЗ на основі існуючих на ринку пропозицій.
  - Розробка конфігурації обладнання для ВОЛЗ типу NIL між містами в Україні на основі існуючих на ринку пропозицій.
  - Оформлення звіту, перевірка, захист.

5. Перелік графічного (ілюстративного) матеріалу (із зазначенням обов'язкових креслень, плакатів, презентацій тощо)

- 1) Типова система WDM
- 2) Спрощена схема EDFA

6. Консультанти розділів роботи

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	завдання прийняв

7. Дата видачі завдання \_\_\_\_\_

### Календарний план виконання роботи

№ з/п	Назва етапів виконання дипломної роботи	Термін виконання етапів роботи	Примітка
1	Пошук та ознайомлення з літературними джерелами за темою практики	1.04.20	
2	Аналіз поточного стану ринку обладнання для волоконно-оптичних ліній зв'язку (ВОЛЗ)	8.04.20	
3	Аналіз характеристик волокна, підсилювачів, детекторів та випромінювачів.	15.04.20	
4	Проектування ВОЛЗ на основі існуючих на ринку пропозицій	18.04.20	
5	Розробка конфігурації обладнання для ВОЛЗ типу NPL між містами в Україні на основі існуючих на ринку пропозицій	28.04.20	
6	Оформлення звіту, перевірка, захист.	04.06.20	

Студент

\_\_\_\_\_  
(підпис)

В.В. Воровський

(ініціали, прізвище)

Керівник роботи

\_\_\_\_\_  
(підпис)

Ю.І. Якименко

(ініціали, прізвище)

\* Консультантом не може бути зазначено керівника дипломної роботи.

## РЕФЕРАТ

Дипломна робота присвячена наддовгим волоконно-оптичним лініям зв'язку (ВОЛЗ) типу «Nothing In Line» (NIL) з використанням оптичних підсилювачів EDFA на кінцевих пунктах прийому/передачі. Метою роботи є розрахунок параметрів підсилювачів та модулів для існуючої траси ВОЛЗ за технологією NIL в Україні на відстань понад 250 км.

У роботі проведено детальний аналіз структурних елементів ВОЛЗ та розрахунок їх параметрів для даного випадку. Траса була обрана з міркувань забезпечення потреб економіки та населення України. Розрахункова частина роботи була проведена вручну. Загальний обсяг роботи: 62 сторінки, 13 ілюстрацій, 2 таблиці, 14 посилань, 0 додатків.

Ключові слова/скорочення: ВОЛЗ, оптичне волокно, EDFA, підсилювач, DWDM, оптичний модуль, випромінювач, приймач, технологія, структура, кабель, ринок, NIL, параметри.

## ABSTRACT

The thesis is devoted with ultra-long fiber optic communication lines (FOCL) «Nothing in line» (NIL) type using EDFA optical amplifiers at the end points of reception/transmission. The purpose of this work is to calculate the parameters of amplifiers and modules for the existing line using NIL technology in Ukraine for a distance of more than 250 km.

In this work developed a detailed analysis of the structural elements of the (FOCL) and the calculation of their parameters for this case. The line was chosen for the needs of the economy and the population of Ukraine. The calculation part of the work was done manually. Total volume of work: 62 pages, 13 illustrations, 2 tables, 14 links, 0 applications.

Keywords / abbreviations: FOCL, optical fiber, EDFA, amplifier, DWDM, optical module, emitter, receiver, technology, structure, cable, market, NIL, parameters.

## ЗМІСТ

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ, СИМВОЛІВ, ОДИНИЦЬ СКОРОЧЕНЬ І ТЕРМІНІВ .....	8
ВСТУП.....	9
1. ЗАГАЛЬНІ ПОЛОЖЕННЯ.....	10
1.1 Огляд поточного стану .....	10
1.2 Актуальність теми.....	11
1.3 Мета роботи .....	12
2. ЕЛЕМЕНТИ ВОЛЗ.....	13
2.1 Оптичне волокно .....	13
2.2 Волоконно-оптичний кабель (ВОК).....	17
2.3 WDM, DWDM .....	19
2.4 Оптичний модуль (трансивер).....	23
2.4.1 Випромінювачі .....	24
2.4.2 Приймачі .....	27
2.5 Підсилювачі .....	29
3. ПІДСИЛЮВАЧ EDFA.....	33
3.1 Принцип роботи .....	33
3.2 Оптична схема EDFA.....	39
3.3 Основні технічні характеристики.....	41
3.2.1 Коефіцієнт посилення.....	42

3.2.2 Вихідна потужність сигналу і енергетична ефективність накачування .....	43
3.2.3 Шум-фактор.....	45
3.2.4 Ширина і рівномірність смуги посилення.....	50
4. РОЗРАХУНОК ВОЛЗ ЗА ТЕХНОЛОГІЄЮ «НІЧОГО В ЛІНІЇ» .....	54
4.1 Огляд інфраструктури ВОЛЗ в Україні .....	54
4.2 Огляд обладнання .....	56
4.3 Розрахунок максимальної довжини ВОЛЗ.....	57
РЕЗУЛЬТАТИ І ВИСНОВКИ .....	59
ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ .....	61

## **ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ, СИМВОЛІВ, ОДИНИЦЬ СКОРОЧЕНЬ І ТЕРМІНІВ**

APD – Avalanche Photodiode (Лавинний фотодіод);

ASE – Посилене спонтанне випромінювання;

DWDM – Dense Wavelength Division Multiplexing (Щільне мультиплексування з розділенням по довжині хвилі);

EDFA – Erbium Doped Fiber Amplifiers (Оптичний підсилювач легований ербієм);

EML – Electroabsorptive Modulated Laser (Електроабсорбційні модульовані лазери);

NIL – «Nothing In Line» («Нічого в лінії»);

VCSEL – Vertical-cavity surface-emitting laser (Поверхнево-випромінюючі лазери з вертикальним резонатором);

WDM – Wavelength Division Multiplexing (Мультиплексування з розділенням по довжині хвилі);

ВОК – Волоконно-оптичний кабель;

ВОЛЗ – Волоконно-оптичні лінії зв'язку;

НПЛП – Напівпровідникові лазерні підсилювачі;

НРП – Необслуговуваний регенераційний пункт;



## ВСТУП

За останні двадцять років потреби людства в обміні інформацією зросли багаторазово. Набагато збільшилася швидкість мереж передачі даних і їх географічне охоплення. Швидка і надійна передача даних придбала важливість для розвитку багатьох сторін життя сучасної людини, державного управління, промисловості і суспільства в цілому. Потреба в збільшенні пропускної здатності каналів зв'язку найбільш гостро відчувається в Північній Америці, Європі та Азії і постійно зростає в усьому світі.

Волоконно-оптична лінія зв'язку (ВОЛЗ) – це вид системи передачі, в якій інформація передається по оптичним волокнам. Технології волоконно-оптичних мереж набули популярності і стали незамінними завдяки швидкій передачі даних.

## 1. ЗАГАЛЬНІ ПОЛОЖЕННЯ

### 1.1 Огляд поточного стану

EDFA підсилювачі використовуються найбільш широко в порівнянні з іншими типами оптичних підсилювачів (раманівськими, напівпровідниковими). Вони мають певні характеристики, що роблять їх ідеальними для використання в оптичних комунікаціях, а саме: коефіцієнт посилення, незалежність від поляризації, низькі перехресні перешкоди між каналами, широка полоса робочих частот та низький рівень генерації шумів. Таким чином, EDFA дійсно є найкращим з існуючих способом посилення сигналу по швидкісним лініям зв'язку.[1]

Сьогодні активно застосовуються підсилювачі EDFA на кремнієвій і фторцирконатній основі. Обидва типи використовуються у всьому робочому діапазоні ербію (1530-1560 нм).

Одна з проблем EDFA на кремнієвій основі – це досить сильна залежність коефіцієнта посилення від довжини хвилі, що ускладнює їх використання в DWDM-системах. Для таких EDFA використовується накачування на довжині хвилі 980 нм.

EDFA на фторцирконатній основі містять більше ербію, але мають більш високий рівень шумів через використання лазера накачування 1480 нм.[2]

Основні виробники підсилювачів EDFA на сьогоднішній день:

1. «ФайберТрейд» – російська компанія, що спеціалізується на розробці, виробництві та поставці телекомунікаційного обладнання. Володіючи власною науковою та виробничою базою, компетенції компанії дозволяють

швидко реагувати на потреби ринку і пропонувати сучасні та високотехнологічні рішення.

2. Компанія «ОПТОКОН a.s» являється одним з провідних світових виробників і постачальників інфраструктурних рішень будь-якого рівня складності. Компанія була заснована в 1991 році. Головний офіс розташований в м. Йиглава (Чеська Республіка). Також компанія має дуже широку дистрибуторську мережу, що дозволяє поставляти продукцію в більш ніж 45 країн по всьому світу (в тому числі в Україну).
3. Shandong Wanshuo Optoelectronic Equipment Co., Ltd. – китайська компанія, є професійним виробником та постачальником оптичного обладнання та рішень в галузі зв'язку. Завдяки незалежним технологіям, можливостям досліджень і розробок та великій виробничій потужності компанія займає високі позиції на ринках Росії, Південної Америки, Південно-Східної Азії та Китаю.
4. ТМ «А-Gear» – ще одна китайська компанія, широку популярність на ринку України здобула більше семи років тому. Компанія зарекомендувала себе, як професійне мережеве обладнання, яке повністю відповідає відношенню ціна/якість.

## **1.2 Актуальність теми**

Швидка надійна передача різних видів інформації (відео, голосу, даних) необхідна для розвитку економіки і суспільства в цілому. Оптичне волокно здатне передавати велику кількість інформації завдяки дуже високій частоті світлових хвиль ( $10^{14}$  Гц). Тому розвиток і впровадження оптичних технологій - це основний шлях до задоволення зростаючих потреб суспільства в обміні

інформацією. Максимальна одноканальна швидкість передачі даних в промислових масштабах за допомогою ВОЛЗ на сьогоднішній день перевищує 110Гбіт/с. А за допомогою систем мультиплексування WDM показник швидкості можна збільшити в десятки й сотні разів. Вчені вважають, що людство ще не досягло межі у розвитку цієї технології, тож для сьогодення ця тема є винятково актуальною.

Принцип технології Nothing In Line заключається у відсутності протягом лінії будь-якого допоміжного обладнання, тобто відсутності необслуговуваних регенераційних пунктів (НРП). Ця технологія актуальна, тому що обслуговування НРП призводить до додаткових накладних витрат (амортизація обладнання, оренда приміщення, використання електроренергії підсилювачами та кондиціонерами, охорона). У трансатлантичних кабелях, що проходять по дну океанів, доводиться підводити струм до підсилювачів по провіднику всередині кабелю. Ця технологія вимагає ще більших витрат, ніж обслуговування НРП на суші.

### **1.3 Мета роботи**

Головною метою дипломної роботи є розробка волоконно-оптичної лінії зв'язку за технологією Nothing In Line (NIL) з використанням оптичних підсилювачів EDFA на кінцевих пунктах прийому/передачі на відстань понад 250 км. Ознайомлення з будовою, принципом роботи та основними характеристиками структурних елементів ВОЛЗ. Розрахунок параметрів відповідних елементів для обраної лінії. Детальне ознайомлення з принципом роботи EDFA підсилювачів.

## 2. ЕЛЕМЕНТИ ВОЛЗ

### 2.1 Оптичне волокно

Основне завдання волокна – передача світлових хвиль з мінімальним загасанням. Оптичне волокно являє собою прозору скляну нитку з ядром і оболонкою, яка може передавати світло зі швидкістю  $2/3$  с. Спрощено передача світла по волокну пояснюється повним внутрішнім віддзеркаленням.

Повне внутрішнє віддзеркалення відбувається, коли виконуються наступні умови:

1. Промені світла проходять з середовища з більш високим коефіцієнтом заломлення в середовище з більш низьким коефіцієнтом заломлення;
2. Кут падіння нижче критичного кута. (Критичний кут - це кут падіння, при якому світло перестає заломлюватися і повністю відбивається).

Принцип повного внутрішнього відбивання в ядрі волокна показано на рис. 2.1. Ядро має коефіцієнт заломлення вище, ніж оболонка, що дозволяє променям, які падають під кутом, менше критичного, відбиватися. Другий промінь падає під кутом, більше критичного, і заломлюється.

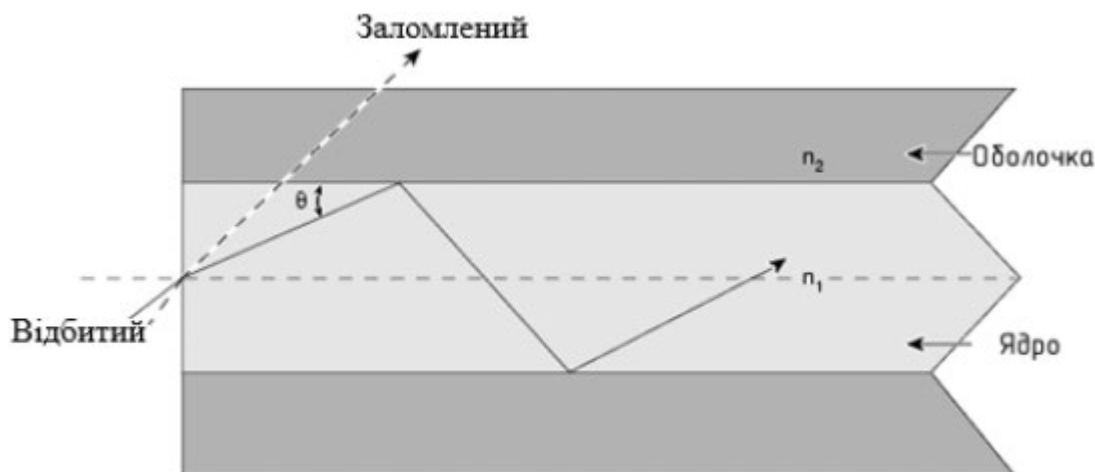


Рисунок 2.1 – Принцип повного внутрішнього відбивання

Оптичне волокно в загальному випадку складається з двох різних типів високоочищеного, монолітного скла (кварцового) - ядро і оболонка - легованого особливими елементами для різниці коефіцієнтів заломлення. Різні коефіцієнти заломлення потрібні для того, щоб передане світло відбивалося від оболонки і залишалося в ядрі. Необхідний критичний кут досягається шляхом зміни кута, під яким світло потрапляє в волокно.

Розвиток оптичного волокна тісно пов'язаний з використанням специфічних областей в оптичному діапазоні, де оптичні загасання невисокі. Ці області називаються «вікнами» і лежать між областями сильного поглинання енергії. Ранні системи були розроблені для роботи в діапазоні довжин хвиль близько 850 нм - в першому «вікні» волокна на основі кремнію. Друге вікно (S-band) в околицях довжини хвилі 1310 нм незабаром виявилось більш перспективним через менші згасання. За ним послідувало третє вікно (C-band) з піком на довжині хвилі 1550 нм, і четверте (L-band) на довжині хвилі 1625 нм в даний час знаходиться в розробці. Ці вікна показані на електромагнітному спектрі на рис. 2.2.

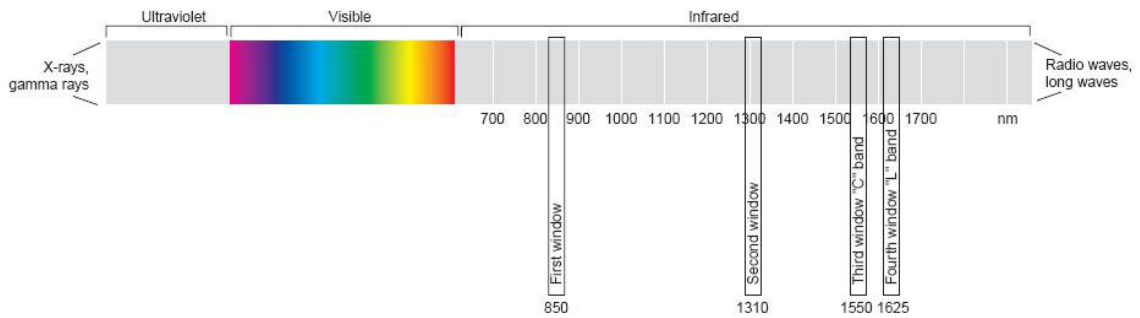


Рисунок 2.2 – Використовувані в оптоволокну частоти

Оптичні волокна в загальному випадку діляться на багатомодові і одномодові.

Багатомодове волокно - перший тип волокна, запущений у виробництво. Багатомодове волокно здатне передавати одночасно велику кількість мод - променів світла. Однак дві різні моди в такому волокні проходять різний шлях від передавача до приймача. Невідповідність часів, за які промені добираються до мети, називається міжмодовою дисперсією. Це явище призводить до сильного погіршення сигналу на виході і обмежує дистанцію, на яку передається сигнал. З цієї причини багатомодове волокно не використовується в системах DWDM, які знайшли найбільше застосування саме в лініях далекого зв'язку.

Другий, основний тип волокна - одномодовое - має значно менший діаметр ядра, що дозволяє тільки одній моді поширюватися по волокну. Через відсутність міжмодової дисперсії сигнал, що проходить по волокну, значно менше спотворюється, що забезпечує одномодовому волокну більш високу пропускну здатність. Через високу пропускну здатність і низькі втрати, таке волокно використовують для передачі інформації на великі відстані в т.ч. і в системах DWDM.

Багатомодові і одномодові волокна в свою чергу діляться на різні типи. Однак, оскільки багатомодове волокно не використовується в системах DWDM їх ми розглядати не будемо.

Основні типи одномодових волокон:

1. G.652 одномодове стандартне (SM - Single Mode);
2. G.657 одномодове підвищеної гнучкості (BIF - Bend-Insensitive Fiber);
3. G.653 зі зміщеною дисперсією (DS - Dispersion Shifted);
4. G.654 одномодове зі зміщеною довжиною хвилі відсічки;
5. G.655 з ненульовою зміщеною дисперсією (NZDS - Non-Zero Dispersion Shifted).[8]

Оптичне волокно характеризується двома важливими параметрами: затухання і дисперсія. Чим менші значення цих параметрів, тим більшу відстань може пройти сигнал до наступного підсилювача.

На затухання світла в волокні впливають такі фактори: втрати на поглинання, втрати на розсіювання (Релеївське), кабельні втрати.

Втрати на поглинання складаються з власних втрат в кварцовому склі (ультрафіолетове та інфрачервоне поглинання) та з втрат, пов'язаних з поглинанням світла у домішках. Але зараз виготовляється волокно на 99,9999% чисте, тому наявність домішок майже не впливає на затухання.

Релеївське розсіювання спричиняється наявністю неоднорідностей мікроскопічного масштабу в волокні. Світло потрапляє на них і розсіюється у різних напрямках. Такі неоднорідності з'являються при виготовленні волокна. Втрати на



релеївському розсіюванні залежать від довжини хвилі і сильніше проявляються в області коротких довжин хвиль.

Кабельні втрати обумовлені скруткою, деформаціями та вигинами волокон, що виникають під час виготовлення та прокладки кабеля. При виконанні технічних умов на прокладку кабеля номінальний вклад зі сторони кабельних втрат складає не більше 20% від повного затухання. Додаткові кабельні втрати з'являються, якщо радіус вигину кабеля стає менше, ніж вказано в специфікації.

Довжина хвилі, на якій досягається мінімальне значення затухання складає 1550 нм і визначається компромісом між втратами внаслідок релеївського розсіювання та інфрачервоного поглинання.

Основною формою дисперсії являється хроматична дисперсія, що створює серйозний вплив на роботу систем передачі даних на одномодових волокнах. Хроматична дисперсія виникає тому, що різні частотні складові імпульсу, а також сигнали різних довжин хвиль розповсюджуються в волокні з неоднаковими груповими швидкостями і тому поступають на інший кінець в різний час. Вона збільшується зі збільшенням довжини хвилі лінії зв'язку і вимірюється в пс/нм\*км.

Зазвичай суттєвий вплив дисперсії (розтікання фронтів) спостерігається починаючи з дистанцій 1000 ... 5000 км, тому в даній роботі її враховувати не обов'язково.

## **2.2 Волоконно-оптичний кабель (ВОК)**

Існує декілька видів ВОК в залежності від умов прокладання:

1. В ґрунт – застосовується при наявності особливо високих потреб по механічній стійкості: в ґрунтах всіх груп, в болотах, неглибоких ріках;
2. Підводний – застосовується для прокладки та експлуатації на морських участках (при берегових та глибоководних), на річних переходах, участках водойм (озера, водосховища), в районах з активними проявами мерзлотно-ґрунтових процесів, включаючи болота;
3. В кабельну каналізацію – застосовується в кабельній каналізації, лотках, блоках, тунелях, колекторах при загрозі пошкодження гризунами;
4. В труби – застосовується для задувки в ЗПТ (захисні поліетиленові труби), а також в кабельній каналізації (за відсутності загрози пошкодження гризунами);
5. Підвісний з виносним силовим елементом – застосовується для підвісу на опорах ліній зв'язку, стовпах освітлення, між будівлями і спорудами. В діелектричному виконанні допускається підвіс на лініях електропередач та енергооб'єктах;
6. Підвісний самонесучий – застосовується для підвісу на опорах ліній зв'язку, ліній електропередач, контактній мережі залізних дорог, в тому числі при високих потребах стійкості до зовнішніх електромагнітних впливів;
7. Розподільний – застосовується для прокладки всередині будівель, в кабельних лотках, каналах. Прокладається по зовнішнім фасадам, а також в кабельній каналізації, трубах, блоках, в ЗПТ.[6]

## 2.3 WDM, DWDM

Системи WDM засновані на здатності оптичного волокна одночасно передавати світло різних довжин хвиль без взаємної інтерференції. Кожна довжина хвилі являє собою окремий оптичний канал в волокні. Існують різні оптичні методи для того, щоб об'єднати кілька каналів в одному волокні, а потім виділити їх в потрібних точках мережі. На сьогоднішній день технологія WDM дозволяє передавати по одному волокну канали з різницею довжин хвиль між сусідніми каналами всього в частки нанометра, що називається щільним хвильовим мультиплексуванням DWDM (Dense WDM). Розвиток технології WDM дозволив створити комерційні мережі, в яких по окремим волокнам передається більше сотні незалежних оптичних каналів, а також мережі, в яких передача сигналів здійснюється в обох напрямках в одному і тому ж оптичному волокні.

Своїми успіхами технологія DWDM багато в чому зобов'язана досягненням в розробці підсилювачів на оптичному волокні, легованому ербієм EDFA. У цих пристроях за рахунок енергії лазера накачування відбувається посилення всіх потрапляючих на вхід каналів, довжини хвиль яких лежать в діапазоні 1530-1565нм - робочому діапазоні підсилювача. В підсилювачі EDFA оптичні сигнали підсилюються без перетворення в електричні і назад, що дає можливість створювати мережі передачі даних високої протяжності при значній економії електронних компонентів або взагалі без них.

Перші пристрої WDM дозволяли передавати по одному волокну від 4 до 16 каналів, кожен з яких підтримував передачу сигналів синхронної цифрової ієрархії SDH/SONET зі швидкістю 2,5 Гбіт/с. Сьогодні виробники обладнання DWDM розробляють системи ємністю в кілька десятків каналів. Існують системи, які дозволяють передавати по одному оптичному волокну сотні каналів і за сумарною

швидкості передачі наближаються до 1 Тбіт/с. Системи з такою пропускною здатністю представляють винятковий інтерес для операторів зв'язку. На рис. 2.3 показані можливості збільшення пропускної здатності мережі за рахунок застосування технології WDM.[5]

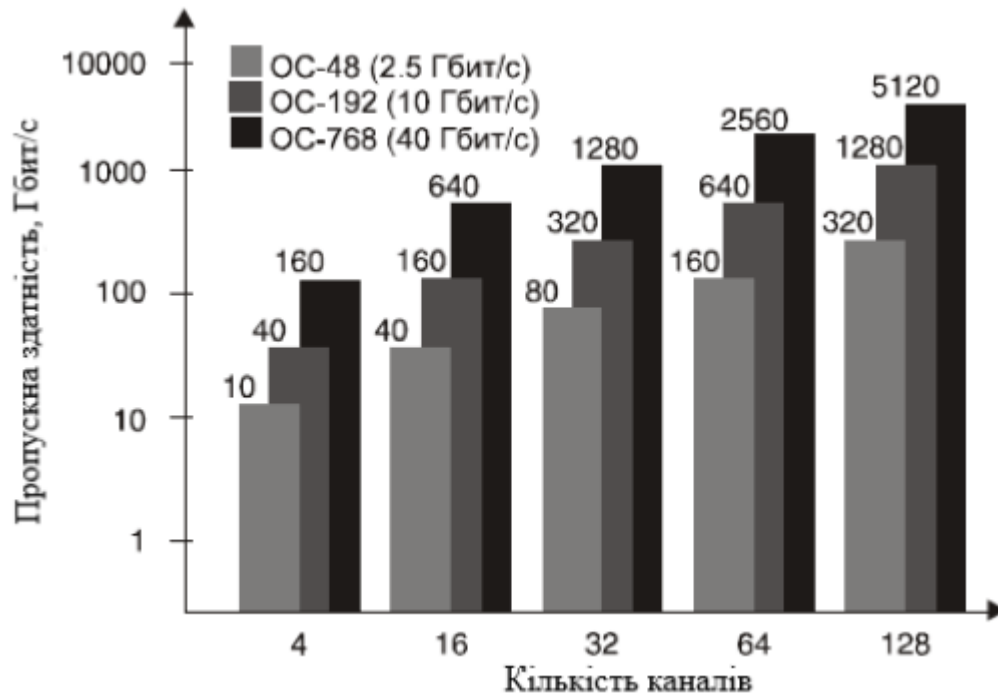


Рисунок 2.3 – Стрімкий ріст пропускної здатності лінії зв'язку зі збільшенням кількості каналів

В системі DWDM сигнали різних довжин хвиль, що генеруються одним або декількома оптичними передавачами, об'єднуються мультиплексором в багатоканальний складений оптичний сигнал, який далі поширюється через оптичне волокно. Демультиплексор приймає складений сигнал, виділяє з нього вихідні канали різних довжин хвиль і направляє їх на відповідні фотоприймачі. На проміжних вузлах деякі канали можуть бути додані або виділені зі складеного сигналу за допомогою мультиплексорів вводу/виводу OADM (Optical Add/Drop Multiplexer) або пристроїв крос-комутації.

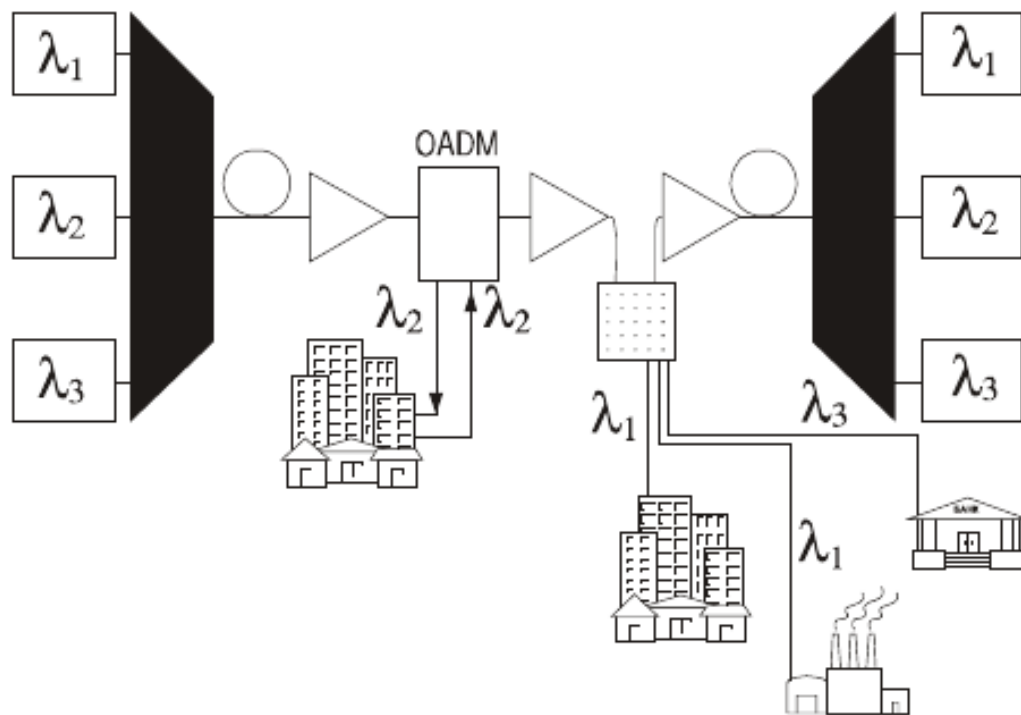


Рисунок 2.4 – Типова система WDM з можливістю додавання/виділення і крос-комутації каналів

Система DWDM складається з одного або декількох лазерних передавачів, мультиплексора, одного або декількох підсилювачів EDFA, мультиплексорів вводу/виводу, оптичного волокна (кабеля), демультиплексора і відповідного числа фотоприймачів, а також електронного обладнання, яке обробляє дані, що передаються відповідно до використовуваних протоколів зв'язку, і системи мережевого управління.

Найпростіша система WDM може бути представлена у вигляді паралельного з'єднання оптичних каналів, що відрізняються довжиною світлової хвилі і характеризуються єдиним способом передачі. Така побудова системи, навіть без урахування взаємодії сигналів, вимагає нового підходу до критерію вибору компонентів, зокрема, всі канали повинні розглядатися як рівні за довжиною

оптичні з'єднання. Для того щоб домогтися бажаної якості роботи всієї мережі, ця вимога зумовлює необхідність дуже ретельного вибору спектра для оптичних джерел, мультиплексорів, демультимплексорів, оптичних підсилювачів і самого оптичного волокна. Крім цього, для зменшення несприятливих взаємодій між компонентами мережі слід брати до уваги і взаємодію каналів. Отже, в системах WDM оптичні характеристики пасивних компонентів мережі, такі, як вносимі втрати, зворотне відображення, поляризація, повинні вимірюватися як функції довжини хвилі по всій ширині використовуваного спектра. Необхідно також враховувати інший підхід для визначення характеристик елементів, які використовуються в системах WDM і відсутніх в однохвильових системах, таких, як мультиплексори/демультиплексори, дифракційні решітки, оптичні фільтри і особливо активні компоненти - оптичні підсилювачі. Особливу увагу до оптичних підсилювачів продиктовано тим, що в розглянутих системах першорядне значення набуває їх вплив на якість і цілісність сигналу.

Хоча при постачанні обладнання надійними постачальниками можна бути впевненим, що воно було належним чином протестовано на заводі-виробнику на предмет відповідності всім необхідним характеристикам, робота багатьох компонентів в реальних умовах може значно погіршити якість системи. Більш того, характеристики окремих компонентів при їх об'єднанні в систему можуть надати взаємний вплив найнесподіванішим чином, в результаті послуги мережі, що відповідають даним рекомендаціям, можуть бути гарантовані тільки в разі, коли не лише окремі компоненти, а вся система в цілому буде задовольняти потрібним характеристикам.

Тестування компонентів може викликати багато складнощів. Різниця довжин хвиль сусідніх каналів в системах DWDM дуже мала, і параметри багатьох компонентів (наприклад, мультиплексорів) повинні строго відповідати межам

допустимих відхилень. При великому числі каналів використовуваний спектральний діапазон стає досить широким, і підтримка близьких значень параметрів для всіх каналів (коефіцієнта посилення, дисперсії, рівня вносимих шумів і т.д.) стає досить складним завданням.

## 2.4 Оптичний модуль (трансивер)

Волоконно-оптичні трансивери служать для передачі даних по волоконно-оптичній лінії зв'язку шляхом перетворення електричного сигналу в оптичний і назад. Використовуються для приєднання плати мережевого пристрою до оптичного волокна. Більшість оптичних модулів оснащені приймачем і випромінювачем. Існує велика кількість різновидів оптичних модулів, які відрізняються різними характеристиками, наприклад: швидкістю передачі даних, форм-факторами, дальністю роботи.

Таблиця 2.1 – Форм-фактори трансиверів

Наименование	Скорость передачи	Рабочее расстояние
SFP	до 4,25 Гбит/с	до 200 км
SFP+	до 11,1 Гбит/с	до 100 км
SFP28	до 28 Гбит/с	до 25 км
XFP	10 Гбит/с	до 120 км
X2	10 Гбит/с	до 80 км
XENPAK	10 Гбит/с	до 80 км
QSFP+	40 Гбит/с	до 40 км
QSFP28	до 112 Гбит/с	до 40 км
CFP	до 112 Гбит/с	до 40 км
CFP2	до 112 Гбит/с	до 40 км
CFP4	до 112 Гбит/с	до 40 км

Залежно від типу оптичний модуль може мати один або два порти. Два оптичних порти використовуються на модулях, які працюють по двом волокнам. У таких модулях передавач (Tx - Transmitter) і приймач (Rx - Receiver) виведені на два різних порти. Прикладом можуть служити стандартні двоволоконні модулі, модулі спектрального ущільнення CWDM або DWDM, модулі 40G або 100G.

Передавач і приймач можуть бути виведені на один оптичний порт за допомогою фільтра або циркулятора. У цьому випадку прийом і передача сигналу здійснюється по одному волокну. Зазвичай це модулі WDM або Bi-Di CWDM. Одноволоконні модулі замість оптичного порту можуть мати фіксований оптичний пігтейл з конектором.

Головним параметром оптичного модуля є оптичний бюджет (Link Budget) – може називатися так само AR - Attenuation range або OLL - Optical Link Loss. Він характеризує максимально допустимі втрати, які можуть виникнути в лінії без перешкод для передачі даних. Оптичний бюджет розраховується як різниця між мінімальною потужністю передавача і граничною чутливістю приймача. Виходячи з цього параметра може бути розрахована гранична дальність передачі даних без врахування впливу дисперсії.

### **2.4.1 Випромінювачі**

Тип випромінювача передавача визначається вимогами до дальності і швидкості передачі даних. В телекомунікаційній галузі використовується декілька видів лазерів:

1. Лазери Фабрі-Перо (FP - Fabry-Perot) є найпростішими випромінювачами, які дозволяють створювати телекомунікаційні передавачі, придатні для відстаней



більше 10 км. Такі лазери можуть використовуватися в одномодових (ОМ) і багатомодових (БМ) передавачах, при цьому для ОМ довжини хвиль 1310 і 1550 нм (використовуються для відстаней до 5 км), для БМ доступні довжини хвиль 850 і 1300 нм. Швидкість передачі даних у таких передавачів зазвичай не перевищує 1 Гбіт/с;

2. Поверхнево-випромінюючі лазери з вертикальним резонатором (VCSEL - Vertical-cavity surface-emitting laser) забезпечують швидкість передачі даних до 25 Гбіт/с. Вартість виробництва передавачів на їх основі мінімальна і лазери з довжиною хвилі 850 нм набули поширення в багатомодових системах на коротких дистанціях, тому що характеристики цих лазерів не дозволяють використовувати їх на довгих дистанціях. Такі лазери відрізняються високою температурною стабільністю і малою споживаною потужністю;
3. Лазери з розподіленим зворотним зв'язком (DFB - Distributed FeedBack) забезпечують високу потужність випромінювання і зберігають при цьому вузьку ширину спектра випромінювання. Ця властивість DFB використовується при створенні передавачів для протяжних ліній зв'язку на основі одномодового волокна. Наприклад, з передавачами на DFB лазері канал 1 Гбіт/с може бути організований на відстані до 150 км. При цьому канал на швидкості 10 Гбіт / с може бути організований не більше ніж на 40 км. Відносно вузький спектр випромінювання дозволив використовувати такі лазери в системах грубого спектрального ущільнення CWDM. Висока температурна стабільність і можливість підстроювання довжини хвилі дозволяє лазерам DFB використовуватися в системах з більш строгими вимогами до випромінювачів;
4. Електроабсорбційні модульовані лазери (EML - Electroabsorptive Modulated Laser) мають хороші спектральні характеристики і можуть бути використані в

передавачах для протяжних ліній зі швидкістю передачі даних до 100Гбіт/с. За своєю структурою це DFB лазер із зовнішнім електроабсорбційним модулятором EAM. Лазери EML в основному використовуються в передавачах для відстаней більше 40 км і систем спектрального ущільнення CWDM та DWDM. До недоліків EML можна віднести високу розсіюючу потужність і дуже високу вартість.

Розглянемо основні технічні параметри випромінювачів:

1. Ширина спектра випромінювання (Spectral Width) – визначається типом випромінювача, встановленого в модуль. Вона впливає на величину хроматичної дисперсії, яка збільшується разом з шириною спектра. Для багатомодових випромінювачів цей параметр розраховується як середньоквадратична ширина спектра. Для лазерів FP ширина спектра становить від 3 до 5 нм, для VCSEL 0,5 ~ 1 нм. Для багатомодових систем основним обмежуючим фактором по дальності є міжмодова дисперсія, хроматична дисперсія має малу значимість. Для одномодових систем застосовуються лазери DFB і EML. Особливістю цих лазерів є присутність в спектрі однієї сильно вираженої моди. Ширина спектра випромінювання таких модулів визначається шириною спектра основної моди на рівні -20 дБ. Лазер DFB має ширину спектра 0,1 ~ 0,5 нм, для EML цей показник ще вужче - 0,01 ~ 0,08 нм;
2. Потужність випромінювача (Average output power) для оптичних модулів як правило задається не точним значенням, а деяким діапазоном, за рамки якого це значення не виходить. Пов'язано це з невисокою повторюваністю параметрів при серійному виробництві збірок оптичних передавачів;

3. Коефіцієнт подавлення бокових мод SMSR (Side Mode Suppression Ratio) може бути застосований тільки до одномодових лазерів і визначає мінімальну різницю в потужності випромінювання основної моди і наступної за нею. Для звичайних оптичних модулів значення SMSR витримується на рівні 30 дБ.[9]

## 2.4.2 Приймачі

В оптичних модулях використовуються приймачі двох типів:

1. PIN-діод (P-i-N) дозволяє перетворити світлові сигнали в електричні пропорційно падаючому потоку світла. Фотони падаючого світла поглинаються з подальшим утворенням в напівпровіднику електронно-діркових пар, які при додатковому впливі створюють електричний струм. В основному використовуються діоди на базі InGaAs (індій-галій-арсенід), що мають досить високу квантову ефективність в широкому діапазоні довжин хвиль і володіють чутливістю, достатньою для успішної роботи на волоконно-оптичних лініях різної протяжності з середньостатистичними втратами;
2. Лавинні фотодіоди APD (Avalanche Photodiode) мають високу чутливість, що дозволяє використовувати їх в приймачах модулів, призначених для протяжних ліній і в системах, де потрібна значна різниця між потужністю передавача і чутливістю приймача.

Чутливість діодів APD на 6-8 дБ вище, ніж у інших, при цьому і рівень перевантаження підвищений, що вимагає уважного контролю за потужністю вхідного оптичного випромінювання. В якості поглинаючого шару в телекомунікаційних фотодіодах використовується арсенід галію-індію (InGaAs), який має високий коефіцієнт поглинання на довжинах хвиль, використовуваних в

волоконно-оптичних лініях зв'язку. Повне поглинання випромінювання забезпечує шар InGaAs в кілька мікрометрів.

Розглянемо основні технічні параметри приймачів:

1. Чутливість фотоприймача (Receiver Sensitivity) є характеристикою, яка позначає мінімальний рівень оптичного сигналу, при якому виникає прийнятна кількість помилок прийому. Гранична чутливість приймача оптичного модуля різна для різних швидкостей передачі даних: для 10Гбіт/с порядку -24 дБм, для 1Гбіт/с ~ 35дБм, для 100Мбит/с - до -45 дБм;
2. Рівень перевантаження приймача. Ця характеристика показує, випромінювання якої максимальної потужності може бути подане на фотодіод без шкоди для його функціональності. Перевищення цього значення може привести до помилок в лінії (receiver overload saturation), а при сильному перевищенні може викликати постійне пошкодження приймача (receiver overload damage).
3. Втрати на відбиття від приймача. Значення втрат сигналу на відображенні від приймача означає різницю між рівнем відбитого і прийнятого сигналу. Стандартне значення для телекомунікаційних приймачів на коротких відстанях порядку -14 дБ, для інших не нижче 20 дБ. Пов'язано це з більш простою конструкцією перших модулів, які передбачають виведення випромінювання з волокна без проміжних елементів прямо на фотодетектор.

Оптичний фотоприймач призначений для перетворення вхідних оптичних сигналів в електричні та здійснення їх демодуляції

Зазвичай в якості фотоприймачів використовуються два типи фотодіодів: PIN-фотодіоди та лавинні фотодіоди APD (Avalanche Photodiode). PIN-фотодіоди

працюють зі стандартними низьковольтними джерелами живлення (5В), але вони менш чутливі і мають більш вузьку область спектральної чутливості по порівняно з лавинними фотодіодами. До появи лавинних фотодіодів високошвидкісні PIN-фотодіоди використовувалися на лініях зв'язку зі швидкостями передачі 10 Гбіт/с і 40 Гбіт/с. Лавинні фотодіоди в основному застосовуються на лініях зв'язку великої протяжності, де виправдані їх висока вартість і значно складніші схеми реєстрації оптичних сигналів. Крім того, в багатьох випадках використання фотоприймача з лавинним фотодіодом дозволяє відмовитися від оптичного підсилювача, необхідного в фотоприймачі з PIN-фотодіодом.

## 2.5 Підсилювачі

Оптичні підсилювачі це пристрої, які забезпечують посилення оптичного сигналу без перетворення його в електричну форму. На даний момент існує п'ять основних видів оптичних підсилювачів:

1. Підсилювач з порожниною Фабрі-Перо;
2. Підсилювачі на волокні, що використовують бріллюенівське розсіювання;
3. Підсилювачі на волокні, що використовують Раманівське розсіювання;
4. Напівпровідникові лазерні підсилювачі;
5. Підсилювачі на домішковому волокні;

Перші два види підсилювачів не представляють інтересу для WDM-систем, оскільки вони не здатні забезпечити посилення багатьох каналів одночасно оскільки

працюють в дуже вузькому спектральному діапазоні. З цієї причини розглядати їх ми не будемо.

### 1. Підсилювачі на волокні, що використовують раманівське розсіювання.

Стимульоване раманівське розсіювання - нелінійний ефект, який може використовуватися для перетворення частини енергії з потужної хвилі накачування в слабку сигнальну хвилю. При раманівському розсіюванні частотний зсув між сигнальною хвилею і хвилею накачки ( $|f_2 - f_1|$ ) досить великий, а вихідний спектральний діапазон посилення досить широкий для посилення відразу декількох каналів в WDM сигналі. Великі перехідні перешкоди між посилюваними каналами представляють основну проблему при розробці таких підсилювачів.

### 2. Напівпровідникові лазерні підсилювачі (НПЛП).

Основу НПЛП становить активне середовище, аналогічне тому, яке використовується в напівпровідникових лазерах. У НПЛП відсутні дзеркальні резонатори, характерні для напівпровідникових лазерів. Для зменшення Френелівського відображення по обидва боки активного середовища наноситься спеціальне покриття товщиною  $\lambda/4$  з узгодженим показником заломлення рис2.5.

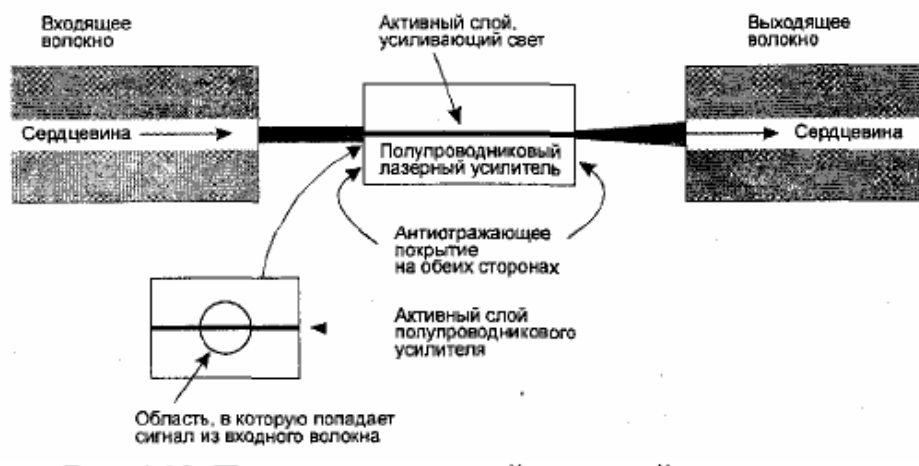


Рисунок 2.5 – Напівпровідниковий лазерний підсилювач

Напівпровідникові лазерні підсилювачі не отримали такого широкого розповсюдження, як підсилювачі на домішковому волокні. Справа в тому, що НПЛП властиві два суттєвих недоліки. Світловипромінюючий активний шар має поперечний розмір кілька мікрон, але товщину в межах одного мікрона, що набагато менше, ніж діаметр світлонесучої частини оптичного волокна ( $\sim 9$  мкм - для одномодового волокна). Внаслідок цього більша частина світлового потоку з вхідного волокна не потрапляє в активну область і втрачається, що зменшує ККД підсилювача. Збільшити ККД можна, поставивши між вхідним волокном і активним середовищем лінзу, але це призводить до ускладнення конструкції.

Другий недолік має більш тонку природу. Справа в тому, що вихід (коефіцієнт посилення) НПЛП залежить від напрямку поляризації і може відрізнятися на 4-8 дБ для двох ортогональних поляризацій. Це небажано, так як в стандартному одномодовому волокні поляризація сигналу, що поширюється, не контролюється.

Два наведених недоліки нівелюються в тих випадках, коли НПЛП інтегрований з іншими оптичними пристроями. І саме так переважно використовуються НПЛП. Одна з можливостей - виробництво поєднаного світловипромінюючого лазерного діода, безпосередньо на виході якого встановлюється НПЛП.

### 3. Підсилювачі на домішковому волокні.

Історія волоконно-оптичних підсилювачів, легованих рідкоземельними елементами, починається з 1960 років, коли вперше був продемонстрований оптичний підсилювач на скляному волокні з покриттям з неодиму при довжині хвилі 1060 нм. Через кілька років було виконано об'єднання фізичних принципів, покладених в основу роботи одномодового скловолокна і напівпровідникового лазера, що

створило умови для появи 1550 нм волоконно-оптичного підсилювача. Так як оптичні втрати в кремнієвому скляному волокні при 1550 нм мають найменше значення ( $-0.2$  дБ \ км), дана довжина хвилі стала найбільш часто використовуватися для дальніх телекомунікацій. Демонстрація в 1987 році підсилювача на волокні легованому ербієм (EDFA) показала великий потенціал волоконно-оптичних підсилювачів. Після отримання цих початкових результатів телекомунікаційні лабораторії по всьому світу почали проводити дослідження, націлені на використання EDFA в оптичних системах зв'язку.



### 3. ПІДСИЛЮВАЧ EDFA

Підсилювачі EDFA існують різних видів і можуть використовуватися по-різному в залежності від обраної області і коефіцієнта посилення.

1. У режимі насичення – як підсилювач потужності (бустер) відразу після випромінювача. Бустер підвищує потужність сигналу до рівня, який не може бути досягнутий на основі лазерного діода, що дозволяє максимально збільшити відстань до наступного підсилювача.
2. У режимі проміжних значень посилення і шуму – як лінійний підсилювач. Лінійні підсилювачі встановлюються в проміжних точках протяжних ліній зв'язку або на виході оптичних розгалужувачів з метою компенсації ослаблення сигналу. Вони замінюють оптоелектронні повторювачі і регенератори в тих випадках, коли немає необхідності в точному відновленні сигналу.
3. У режимі найменшого шуму – як підсилювач перед приймачем. Передпідсилювач підвищує потужність слабкого сигналу в кінці лінії зв'язку. Передпідсилювач практично завжди використовується разом з вузькосмуговим фільтром.

#### 3.1 Принцип роботи

Принцип роботи підсилювачів EDFA заснований на явищі посилення світла при вимушеному випромінюванні (Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation). Це те ж саме явище, яке забезпечує виникнення генерації в лазерах і,

власне кажучи, дало їм назву (слово LASER це і є аббревіатура вищенаведеної фрази). Можливість посилення світла в світловодах, легованих іонами ербію, обумовлюється схемою рівнів енергії даного рідкоземельного елемента.

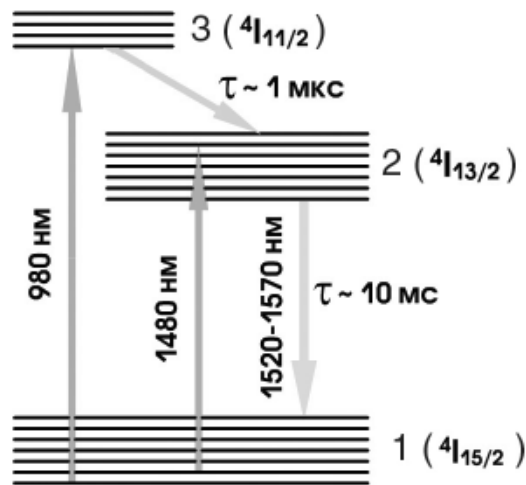


Рисунок 3.1 – Спрощена схема рівнів енергії іонів ербію ( $Er^{3+}$ ) в кварцовому склі

Посилення світла в ербієвому підсилювачі відбувається завдяки переходу між рівнями  $2 \rightarrow 1$  ( $^4I_{13/2} \rightarrow ^4I_{15/2}$ ). Кожен з цих рівнів розщеплений на ряд підрівнів через взаємодію іонів ербію з внутрішньокристалічним полем кварцового скла (ефект Штарка). Під дією накачування, за рахунок поглинання фотонів накачки, іони ербію переходять з основного стану (рівень 1) в верхній збуджений стан (рівень 3), який є короткоживучим (час життя  $\tau_3 = 1$  мкс), і за рахунок процесів релаксації переходять в довгоживучий стан (на метастабільний рівень 2 енергії). Термін метастабільний означає, що час перебування іона ербію на цьому рівні енергії (його також називають часом життя) відносно великий ( $\tau_2 = 10$  мс, тобто  $\tau_2 = 10000\tau_3$ ). Тому число іонів, що знаходяться на рівні 2, при відповідній потужності накачування може перевищувати число іонів на рівні 1. Рівень 1 називається основним станом, тому що за відсутності накачування практично всі іони ербію знаходяться на цьому енергетичному рівні. Частка частинок, що знаходяться на інших рівнях, за відсутності накачування мала.

Число іонів в одиниці об'єму, що знаходяться на деякому рівні енергії, називається населеністю цього рівня. У нормальних умовах, тобто за відсутності накачування, населеність основного рівня енергії речовини максимальна, населеність всіх інших рівнів енергії швидко зменшується зі збільшенням енергії рівня. Стан середовища, при якому населеність деякого більш високого рівня енергії іона перевищує населеність деякого нижчого рівня, є дуже незвичайним і отримав назву стану з інверсією населеності рівнів, або, більш коротко, інверсією населеності.

Відзначимо, що довжина хвилі і спектр посилення жорстко визначені типом активних іонів. Той факт, що спектр посилення волокна, легованого іонами ербію, збігається з областю мінімальних втрат кварцового оптичного волокна, є вдалим збігом.

Не всі іони ербію знаходяться в метастабільному стані і забезпечують посилення. Частина іонів знаходиться на рівні 1 і ці іони, взаємодіючи з фотонами, енергія яких збігається з енергією переходу, ефективно їх поглинають, переходячи на рівень 2. При цьому спектр посилення іонів ербію практично збігається зі спектром поглинання. Якщо кількість іонів, що знаходяться на рівні 2, менше числа іонів, що знаходяться на основному рівні 1, то спостерігається поглинання. Саме тому необхідною умовою посилення світла є створення інверсії населеності між двома робочими рівнями енергії 2 і 1. Для створення інверсії населеності в ербієвому підсилювачі необхідно перевести приблизно половину іонів ербію на метастабільний рівень 2. Потужність накачування оптичного підсилювача, при якій населеність рівнів 1 і 2 рівні, називається пороговою потужністю.

При потужності накачування нижче порогової спостерігається не посилення, а поглинання світлового сигналу. На рис.3.2 представлені спектри поглинання / посилення при різних значеннях відносної населеності рівня 2, що визначається

рівнем потужності накачування. Нижня крива, що спостерігається у відсутності накачування (всі частинки знаходяться в основному стані, населеність рівня 2 дорівнює 0%), відповідає «негативному посиленню», тобто поглинанню у всьому робочому спектральному діапазоні.

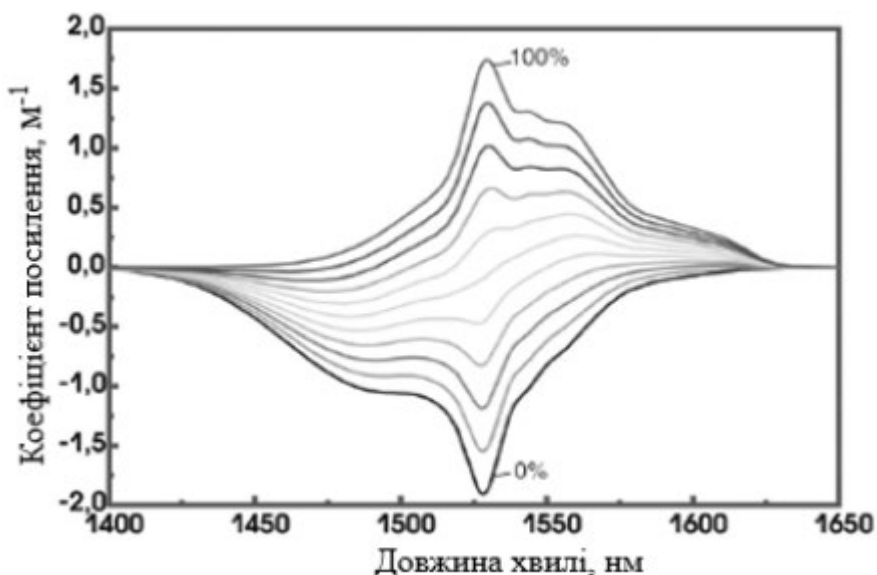


Рисунок 3.2 – Спектральна залежність посилення / поглинання ербієвого волокна при різних значеннях відносної заселеності метастабільного рівня енергії. Нижня (чорна) крива - населеність 0%, верхня крива - населеність 100%. Криві приведені для населеності, що змінюється з кроком 10%

У міру збільшення потужності накачування все більше активних іонів переходить в збуджений стан. Це призводить, як видно з рис.3.2, спочатку до зменшення коефіцієнта поглинання, а потім до посилення світла. Відзначимо також, що спектр посилення зсунутий в довгохвильову область відносно спектра поглинання. Отже, для посилення в довгохвильовій частині спектра потрібно менше значення інверсії.

Точна форма характеристик поглинання та посилення залежить від домішок, доданих до структури скла, які модифікують енергетичну структуру іона. Вибір

стекло з низькою енергією фононів, як, наприклад, фторидне скло ZBLAN, дає можливість рідкоземельним іонам мати більш інтенсивну світлову емісію при переході між енергетичними рівнями на довжинах хвиль 1550 нм.

Підсилювальним середовищем підсилювача є ербієве волокно – волоконний світловод з домішками іонів ербію. Виготовляються такі світлопроводи тими ж методами, що і світловоди для передачі інформації, з додаванням проміжної операції просочення не проплавленого матеріалу серцевини розчином солей ербію або легування іонами ербію з газової фази безпосередньо в процесі осадження серцевини. Хвильоводні параметри ербієвого волоконного світловода роблять подібними з параметрами світловодів, використовуваних для передачі інформації, з метою зменшення втрат на з'єднання. Принциповим є вибір легуючих домішок, які формують серцевину активного світловода, а також підбір концентрації іонів ербію. Різні домішки в кварцовому склі змінюють характер штарківського розщеплення рівнів енергії іонів ербію. У свою чергу це призводить до зміни спектрів поглинання і випромінювання. На рис. 3.3. представлені спектри випромінювання іонів ербію в кварцовому склі, легovanому найчастіше застосовуваними в технології волоконних світловодів домішками. З представлених даних видно, що найбільш широкий спектр випромінювання (а значить, і спектр посилення) досягається при використанні в якості домішки алюмінію. Тому цей елемент став необхідною складовою матеріалу серцевини ербієвих волоконних світловодів.

Концентрація іонів ербію в серцевині оптичного волокна фактично визначає його довжину, яка використовується в підсилювачі при заданих рівнях сигналу і накачування. Довжина волокна може варіюватися від 25 до 100 м, найбільше посилення відбувається при довжині, приблизно 100 м. При зменшенні довжини волокна посилення також зменшується. Верхня межа концентрації активних іонів визначається виникненням ефекту кооперативної ап-конверсії. Це явище полягає в

тому, що при великій концентрації активних іонів можливе утворення кластерів, що складаються з двох і більше іонів ербію. Коли ці іони потрапляють у збуджений стан, відбувається обмін енергіями, в результаті чого один з них переходить в стан з ще більш високою енергією, а другий – безвипромінювально релаксує на основний рівень. Таким чином, частина іонів ербію поглинає випромінювання посиленого сигналу, знижуючи ефективність підсилювача.

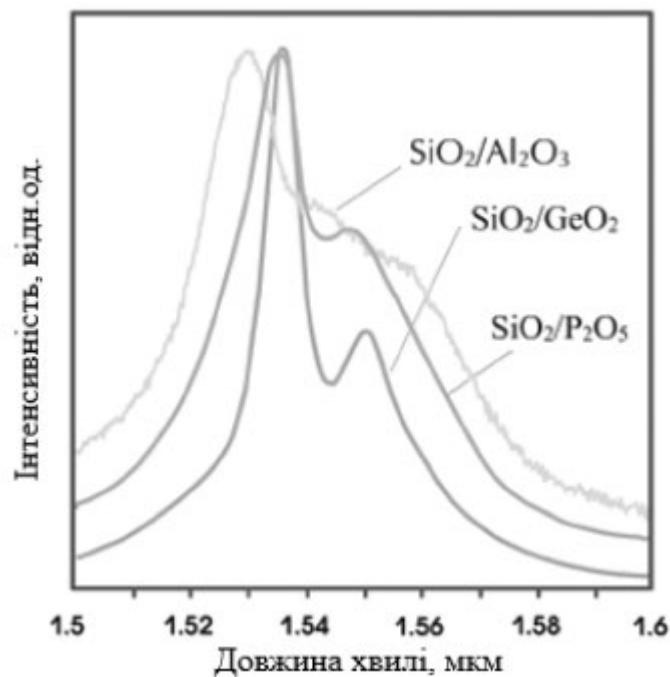


Рисунок 3.3 – Спектри випромінювання іонів ербію в кварцовому склі з різними домішками

Нижня межа по концентрації іонів ербію визначається тим, що занадто довгий активний світловод незручний при виготовленні підсилювача, а також тим, що при використанні великої кількості активного світловода підвищується вартість підсилювача. На практиці концентрація іонів ербію становить  $10^{18} - 10^{19} \text{ см}^3$ , що забезпечує довжину використовуваного активного світловода від декількох одиниць до декількох десятків метрів.

Використання трирівневої схеми накачування призводить до появи наступних важливих властивостей ербієвого підсилювача:

1. Наявності порогової потужності накачування, при якій відбувається «просвітлення» активного волоконного світловода, тобто досягаються нульові втрати. При перевищенні порогової потужності накачування починається посилення сигналу. Залежно від структури активного волоконного світловода, концентрації легуючої домішки і довжини хвилі накачування величина порогової потужності становить від часток до декількох одиниць мВт.
2. Необхідності вибору оптимальної довжини ербієвого волокна, тобто довжини, при якій досягається максимальне посилення при заданій концентрації іонів ербію. При довжині волокна більше оптимальної в далеких ділянках волокна буде спостерігатися поглинання сигналу, а при використанні ербієвого волокна недостатньої довжини випромінювання накачування використовується неповністю. Оптимальна довжина ербієвого волокна залежить від частоти підсилюваного сигналу. Чим менше частота сигналу, тим довший відрізок ербієвого волокна відповідає максимальному посиленню.

При відсутності підсилюваного сигналу іони ербію переходять в основний стан самовільно, випромінюючи фотони з енергією, яка відповідає цьому переходу. Тобто з'являється спонтанне випромінювання.

### **3.2 Оптична схема EDFA**

Спрощена схема ербієвого волоконного підсилювача представлена на рис.3.4. Оптичне накачування, необхідне для переведення іонів ербію в збуджений стан, здійснюється на довжинах хвиль, що відповідають одній з їх смуг поглинання.

Ефективність використання накачування визначається максимальним значенням відношення коефіцієнта посилення до потужності накачування. Джерела накачування видимого діапазону на основі твердотільних і газових лазерів використовувалися на початковому етапі досліджень ербієвих волоконних підсилювачів, поки не були розроблені необхідні напівпровідникові джерела. Найбільша ефективність використання накачування досягається на довжинах хвиль 980 і 1480 нм. Відзначимо, що саме цей факт дав потужний поштовх розвитку напівпровідникової техніки високих потужностей. Якщо в перших експериментах по посиленню сигналу використовувалися напівпровідникові лазери з максимальною потужністю 20 - 30 мВт, то на даний час розроблені пристрої накачування з потужністю в кілька сотень мВт, введеної в одномодове волокно. Велика потужність накачування потрібна, наприклад, для забезпечення високого коефіцієнта посилення одночасно великого числа інформаційних каналів в системах зі спектральним ущільненням (DWDM). Для об'єднання вхідного оптичного сигналу і випромінювання накачування використовуються мультиплексори. Необхідними елементами оптичних підсилювачів є оптичні ізолятори - пристрої, які пропускають світлові сигнали тільки в одному напрямку. Оптичні ізолятори на вході і виході підсилювача застосовуються для того, щоб запобігти проникненню в підсилювач паразитних сигналів, відображених від неоднорідностей лінії зв'язку. Відбиті сигнали, посилені в ербієвому волокні, є джерелом шумів, що погіршують роботу підсилювача.

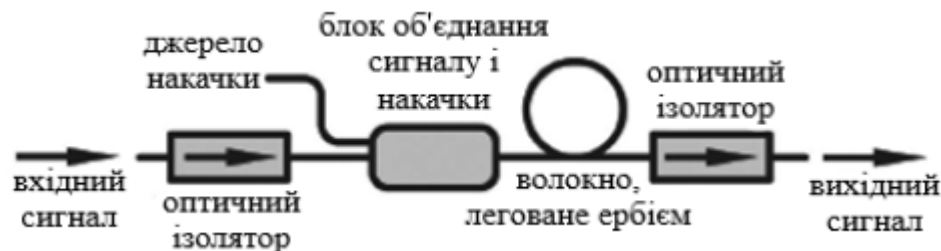


Рисунок 3.4 – Спрощена схема ербієвого оптичного підсилювача



Зображена на рис.3.4 схема підсилювача є варіантом схеми з попутним накачуванням, коли сигнал і випромінювання накачування поширюються в одному і тому ж напрямку. Можливим є варіант із зустрічним накачуванням, а також застосування накачування в двох напрямках. Двонаправлене накачування дозволяє використовувати два джерела накачування, підвищуючи сумарну потужність накачування.

Прямий напрямок накачування дає найбільш низький рівень шуму. Це має перевагу при невеликій потужності вхідного сигналу і максимальних значеннях коефіцієнта посилення.

При зворотному напрямку накачування простіше досягається режим насичення. Це переважає в тих випадках, коли потрібно на виході мати максимально можливу потужність.

При спільному застосуванні двох лазерів накачування різних довжин хвиль рекомендується здійснювати накачування на 1480 нм в зворотному напрямку, а накачування на 980 нм - в прямому. Це дозволяє найкращим чином використовувати переваги обох методів.

### **3.3 Основні технічні характеристики**

Для практичного використання в системах волоконно-оптичного зв'язку найбільше значення мають наступні параметри ербієвих підсилювачів:

- коефіцієнт посилення;
- вихідна потужність і енергетична ефективність;

- шум-фактор і потужність посиленого спонтанного випромінювання;
- спектральна смуга і рівномірність смуги посилення.

### 3.2.1 Коефіцієнт посилення

Коефіцієнт посилення  $G$  визначається як відношення потужності  $P_{out}$  сигналу на виході оптичного підсилювача до потужності  $P_{in}$  сигналу на його вході з урахуванням додаткових втрат на мультиплексорі і в оптичному ізоляторі:

$$G = P_{out} / P_{in}$$

В технічних специфікаціях коефіцієнт посилення виражають в децибелах:

$$g = 10 \times \lg G$$

Якщо потужність вхідного і вихідного сигналів також виражена в логарифмічних одиницях (дБм), то коефіцієнт посилення дорівнює різниці потужностей вихідного і вхідного сигналів:

$$g = p_{out} - p_{in}$$

При оптимізованих параметрах активного волоконного світловода коефіцієнт посилення визначається потужностями накачування  $P_p$  і вхідного сигналу  $P_{in}$ . Коефіцієнт посилення слабкого сигналу, впливом якого на величину населеності рівнів енергії іонів ербію можна знехтувати, називається ненасиченим коефіцієнтом посилення. Ненасичений коефіцієнт посилення збільшується при збільшенні потужності накачування і довжини ербієвого волокна. У той же час необмеженому зростанню коефіцієнта посилення перешкоджають самонасичення підсилювача

посиленим спонтанним випромінюванням і виникнення паразитної лазерної генерації. У лабораторних умовах досягнуто посилення 50 дБ. У серійних ербієвих підсилювачах типові значення коефіцієнта посилення слабкого сигналу знаходяться в районі 30 дБ. Збільшення потужності вхідного сигналу зменшує населеність метастабільного лазерного рівня 2 і, тим самим, знижує коефіцієнт посилення (рис. 3.2).

Для оцінки ефекту насичення в ербієвих підсилювачах часто використовується значення вихідної насичуючої потужності  $P_{Sout}$  або вхідної  $P_{Sin}$ . Вихідна насичуюча потужність  $P_{Sout}$  визначається як значення потужності сигналу на виході, при якій насичений коефіцієнт посилення  $G_s$  в два рази менше коефіцієнта посилення при малому вхідному сигналі  $G$  (при цьому  $g_s[\text{дБ}] = (g - 3)[\text{дБ}]$ ). Аналогічно визначається вхідна насичуюча потужність  $P_{Sin}$ .

### 3.2.2 Вихідна потужність сигналу і енергетична ефективність накачування

Одне із застосувань оптичних підсилювачів в системах зв'язку - посилення потужності сигналів, що вводяться в волоконно-оптичну лінію зв'язку. Вихідна потужність сигналу визначає відстань до наступного підсилювача. Тому важливими параметрами ербієвих підсилювачів, що працюють в якості підсилювачів потужності, є вихідна потужність  $P_{out}$  і енергетична ефективність накачування  $PCE$ . Енергетична ефективність визначається відношенням зміни потужності сигналу до потужності накачування:

$$PCE = \frac{P_{out} - P_{in}}{P_p}$$

Для того щоб забезпечити високу енергетичну ефективність, необхідно, щоб практично всі фотони накачування передавали свою енергію фотонам сигналу. Відношення кількості фотонів сигналу  $NF_s$ , що з'явилися в процесі посилення сигналу, до кількості поглинених фотонів накачування  $NF_p$  називається квантовою ефективністю накачування  $QE = NF_s / NF_p$ . Так як енергія фотона вихідного випромінювання менше енергії фотона накачування, то енергетична ефективність менше квантової і залежить від співвідношення довжин хвиль накачування  $\lambda_p$  і сигналу  $\lambda_s$ :

$$PCE = \frac{\lambda_p}{\lambda_s} \cdot QE$$

Отже, для отримання максимальної енергетичної ефективності перспективніше використовувати накачування на довжині хвилі 1480 нм, а не на довжині хвилі 980 нм. В даний час при накачуванні на довжині хвилі 1480 нм досягнута енергетична ефективність 86%, при квантовій ефективності 91%. Накачування на довжині хвилі 980 нм дозволяє отримати енергетичну ефективність 55% при квантовій ефективності 86%.

Висока енергетична ефективність дозволяє використовувати для накачування джерела випромінювання меншої потужності, а отже, більш дешеві. Ця характеристика особливо важлива в системах зі спектральним ущільненням, де необхідно посилювати одночасно велику кількість сигналів високої сумарної потужності.

Для досягнення рівнів вихідної потужності в сотні мВт і вище розроблені спеціальні волоконні світловоди з подвійною оболонкою і схеми накачування таких світловодів. Підсилювачі на основі ербієвих волоконних світловодів з подвійною

оболонкою забезпечують отримання вихідного випромінювання потужністю більше 1,5 Вт (33 дБ).

Таким чином, для отримання максимальної енергетичної ефективності для накачування ербієвого підсилювача доцільно використовувати випромінювання на довжині хвилі 1480 нм, в той же час накачування на довжині хвилі 980 нм забезпечує менше значення шуму посиленого спонтанного випромінювання.

### 3.2.3 Шум-фактор

Основним джерелом шуму в підсилювачі на волокні, легованому ербієм, є мимовільне (спонтанне) випромінювання при переході іона ербію з метастабільного рівня енергії 2 на основний рівень 1 (рис. 3.1). Це спонтанне випромінювання посилюється і повторно поглинається по всій довжині підсилювача приблизно так само, як слабкий сигнал, що поширюється по підсилювачу. Саме цим пояснюється відмінність між формами спектра посиленого спонтанного випромінювання (ASE) і спектра непосиленого спонтанного випромінювання (SE). Посилене спонтанне випромінювання при поширенні по волоконно-оптичній лінії поглинається і посилюється так само, як і сам інформаційний сигнал. Збільшення потужності ASE призводить до збільшення шуму фотоприймача, який є джерелом помилок в цифрових системах зв'язку. Напівкласична теорія дає такий вираз для середньоквадратичного відхилення фотоструму від середнього значення:

$$\sigma_{eN} = \sigma_{shot} + \sigma_{S-ASE} + \sigma_{ASE-ASE} + \sigma_{th}$$

Перший член  $\sigma_{shot}$  наведеного виразу відповідає флуктуаціям фотоструму, викликаними шумом Шотткі (його ще називають дробовим шумом), походження якого пов'язане з квантовою природою світла. Другий член  $\sigma_{S-ASE}$  - це флуктуації

фотоструму, викликані биттям між сигналом і посиленням спонтанним випромінюванням. Третій член  $\sigma_{ASE-ASE}$  пов'язаний з биттям між різними спектральними компонентами посиленого спонтанного випромінювання, і останній член  $\sigma_{th}$  визначає теплові флуктуації струму фотоприймача. Якість прийнятого системою передачі інформації цифрового сигналу визначається величиною відношення потужності прийнятого електричного сигналу до потужності шуму. Ця величина називається електричним відношенням сигнал/шум ( $SNR_e$ ), дорівнює відношенню квадрата фотоструму, створюваного сигналом, до середньоквадратичного відхилення фотоструму:

$$SNR_e = \frac{I_s^2}{\sigma_{eN}^2}$$

Величина електричного відношення сигнал/шум залежить від характеристик фотоприймача і тому не може безпосередньо характеризувати якість оптичного інформаційного сигналу. Тому для характеристики оптичного сигналу вводиться поняття оптичного відношення сигнал/шум  $OSNR$ . Це відношення в оптичній спектральній смузі  $B_o$  чисельно дорівнює електричному відношенню сигнал/шум  $SNR_e$  в ідеальному фотоприймачі з електричною спектральною смугою  $B_e = B_o$ . Ідеальним називається фотоприймач, в якому відсутні теплові шуми і квантова ефективність якого дорівнює 100%.

Для характеристики якості оптичного підсилювача вводиться параметр  $N_f$ , який отримав назву шум-фактор. Величина шум-фактора є мірою погіршення відношення сигнал/шум вхідного когерентного сигналу  $OSNR_{inCOG}$  при проходженні через оптичний підсилювач:

$$N_f = \frac{OSNR_{inCOG}}{OSNR_{out}}$$

Слід звернути увагу на той факт, що шум-фактор визначає погіршення ідеального когерентного сигналу. При прийомі ідеального оптичного сигналу в фотострумі відсутні флуктуації фотоструму  $\sigma_{S-ASE}$  і  $\sigma_{ASE-ASE}$ , пов'язані з посиленням спонтанним випромінюванням. Тому вираз для оптичного відношення сигнал/шум вхідного сигналу має вигляд (шумом Шотткі нехтують, вважаючи фотоприймач ідеальним):

$$OSNR_{inCOG} = \frac{I_S^2}{\sigma_{shot}^2} = \frac{P_S}{2h\nu_S B_o}$$

Оптичне відношення сигнал/шум вихідного сигналу має вигляд:

$$OSNR_{out} = \frac{(GI_S)^2}{\sigma_{shot}^2 + \sigma_{S-ASE}^2 + \sigma_{ASE-ASE}^2}$$

У наближенні слабких шумів биттям спектральних компонент посиленого спонтанного випромінювання можна знехтувати, тоді:

$$OSNR_{out} = \frac{GP_S}{2h\nu_S B_o + 4(G-1)h\nu_S B_o n_{sp}}$$

де  $G$  - коефіцієнт посилення;  $n_{sp}$  - фактор спонтанного випромінювання, що залежить від середніх населеностей робочих рівнів. Величина фактора спонтанного випромінювання визначає відносні ймовірності спонтанного і вимушеного випромінювання фотона. Оскільки ймовірність спонтанного випромінювання визначається середньо. Населеністю  $\bar{N}_2$  метастабільного рівня енергії 2, а ймовірність вимушеного переходу різницею населеностей  $(\bar{N}_2 - \bar{N}_1)$  рівнів 2 і 1 (рис. 3.1), то:

$$n_{sp} \approx \bar{N}_2 / \left( \bar{N}_2 - \frac{\sigma_a(\lambda_S)}{\sigma_e(\lambda_S)} \cdot \bar{N}_1 \right)$$

де  $\sigma_a(\lambda_s)$  і  $\sigma_e(\lambda_s)$  - січення поглинання і випромінювання іонів ербію на довжині хвилі сигналу.

З отриманих виразів для відношення сигнал/шум вхідного і вихідного сигналів отримуємо значення шум-фактора ербієвого підсилювача:

$$N_f = \frac{1}{G} [1 + 2n_{sp}(G-1)]$$

Мінімальне значення фактора спонтанного випромінювання  $n_{sp}=1$  досягається при повній інверсії населеності робочого переходу ( $\bar{N}_1=0$ ). В цьому випадку в підсилювачах з великим посиленням  $N_f=2$  (шум-фактор в логарифмічних одиницях дорівнює 3 дБ). Значення шум-фактора 3 дБ є мінімально можливим для підсилювачів будь-якого типу з великим посиленням. Типові значення шум-фактора серійних ербієвих підсилювачів складають 5 дБ.

Якщо у вхідному сигналі присутній «класичний» шум, наприклад посилене спонтанне випромінювання від попереднього підсилювача, то погіршення відношення сигнал/шум буде менше значення шум-фактора:

$$1 < \frac{OSNR_{in}}{OSNR_{out}} \leq N_f$$

Оскільки коефіцієнт шуму при великому посиленні залежить тільки від співвідношення населеностей метастабільного рівня 2 і основного рівня 1:

$$N_f \approx 2n_{sp} \approx \bar{N}_2 / \left( \bar{N}_2 - \frac{\sigma_a(\lambda_s)}{\sigma_e(\lambda_s)} \bar{N}_1 \right),$$

забезпечити мінімальне значення шуму можна з використанням накачування великої потужності на довжині хвилі 980 нм, що працює за трирівневою схемою. В



цьому випадку теоретично населеність основного рівня 1 може бути знижена практично до нуля. Випромінювання накачування на довжині хвилі 1480 нм ефективно взаємодіє з іонами ербію, що знаходяться на метастабільному рівні енергії 2, а це призводить до того, що населеність рівня 1 не може бути знижена до нуля. Тому рівень шуму при використанні накачування на довжині хвилі 1480 нм вище, ніж при використанні накачування на довжині хвилі 980 нм. При накачуванні в зустрічному по відношенню до сигналу напрямку шум-фактор також трохи вище, ніж при співнапрямленому накачуванні, оскільки дуже важливо забезпечити більшу населеність метастабільного рівня 2 і малу населеність рівня 1 там, де сигнал є слабким.

На рис. 3.5 представлені спектральні залежності шум-фактора при двох значеннях вхідного сигналу - -30 дБм і -0,5 дБм. Видно, що дана величина не перевищує рівня 5 дБ в діапазоні 60 нм.

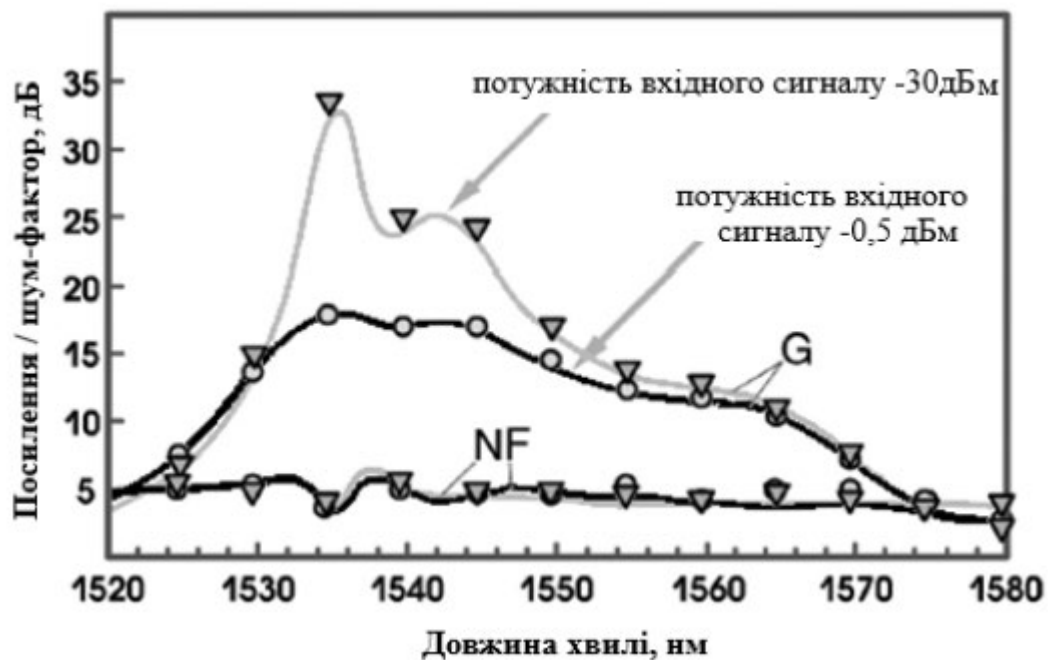


Рисунок 3.5 – Спектральні залежності коефіцієнта шуму та посилення ербієвого підсилювача для двох значень вхідного сигналу

### 3.2.4 Ширина і рівномірність смуги посилення

Ширину смуги посилення можна визначати різними способами. У будь-якому випадку цей параметр повинен давати інформацію про те, що в певному діапазоні довжин хвиль значення посилення не нижче деякого граничного рівня. Як правило, цей рівень становить -3 дБ від максимального значення коефіцієнта посилення. Для багатоканальних волоконно-оптичних систем зі спектральним мультиплексуванням цей параметр є принциповим. Оскільки в даний час число каналів досягає 100 і практично важко реалізувати поділ окремих спектральних каналів з інтервалами менше ніж 0,4 нм (100 ГГц), то ширина спектра посилюваного випромінювання може перевищувати 40 нм. У цих умовах ширина смуги посилення починає робити визначальний вплив на число спектральних каналів, використовуваних для передачі інформації, а значить, і на загальну інформаційну пропускну здатність волокна.

Ширина смуги посилення визначається спектром випромінювання іонів ербію в матеріалі серцевини оптичного волокна. Визначальний вплив матеріалу серцевини волокна на спектр випромінювання пов'язаний з тим, що іони ербію оточені молекулами цього матеріалу. Під дією молекул оточення рівні енергії іонів ербію розщеплюються на підрівні. Величина розщеплення і визначає ширину смуги випромінювання. Чим ширше смуга випромінювання, тим більш широкого спектра посилення можна досягти при конструюванні підсилювача. Найбільш широкий спектр випромінювання мають іони ербію в алюмосилікатному склі. Спектри посилення типового ербієвого підсилювача на алюмосилікатному склі при двох значеннях потужності вхідного сигналу представлені на рис. 3.5.

Збільшуючи довжину активного волокна, вдається отримувати досить великий коефіцієнт посилення аж до довжини хвилі 1560 нм, при перевищенні якої

посилення різко спадає. Таким чином, ширина смуги посилення для традиційної конфігурації підсилювача складає приблизно 30 нм (1530 - 1560 нм). Ця смуга посилення має назву стандартного діапазону (conventional band), або С-діапазону. Інтенсивність люмінесценції має помітне значення аж до 1600 нм. При цьому поглинання в області 1560 - 1600 нм падає дуже швидко, що дозволяє використовувати і цей діапазон для посилення світлових сигналів. Таким чином, виявляється можливим посилення в так званому довгохвильовому діапазоні (long wavelength band) або L-діапазоні, якщо використовувати довге ербієве волокно. Слід зазначити, що при такій конструкції підсилювача активне середовище виявляється не повністю інвертованим, і для оптичних сигналів в С-діапазоні такий пристрій працює як поглинач. Тому перед посиленням оптичні сигнали поділяються за діапазонами С і L, і для кожного використовується свій підсилювач. Спектральні характеристики посилення в обох діапазонах представлені на рис. 3.6. Подальше розширення робочого спектрального діапазону ербієвого підсилювача пов'язане з використанням області 1480 - 1530 нм, або S-діапазону (short wavelength band - короткохвильовий діапазон). Інтенсивність люмінесценції іонів ербію в цій області не менше, ніж в L-діапазоні, проте істотним є сильне поглинання сигналу. Ця проблема вирішується використанням більш потужних джерел накачування в порівнянні з іншими підсилювачами. Друга проблема виглядає більш серйозною і пов'язана вона з сильною конкуренцією між посиленням сигналу в S-діапазоні і спонтанним випромінюванням в С-діапазоні, для якого умови посилення є більш сприятливими. Останнім часом опубліковані кілька робіт, в яких показана можливість посилення в S-діапазоні при використанні фільтрів або введенні вигинних втрат в діапазоні 1530 - 1560 нм для подавлення посиленого спонтанного випромінювання.

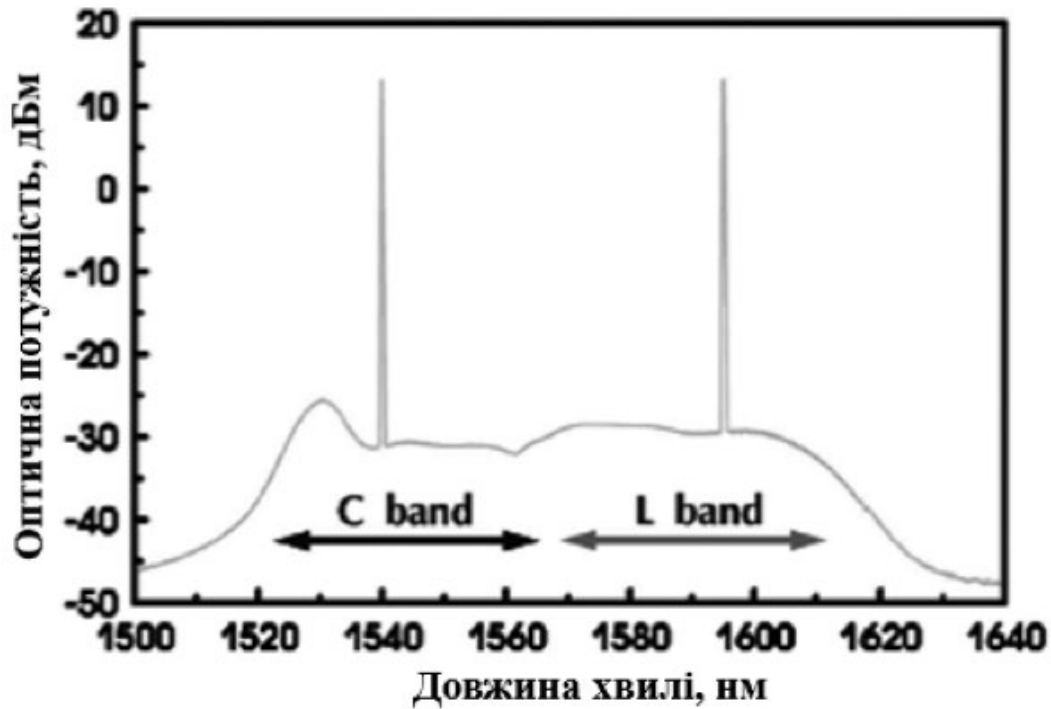


Рисунок 3.6 – Спектральні характеристики дводіапазонного підсилювача

Інший напрямок досліджень в області розширення смуги посилення ербієвих підсилювачів пов'язаний з пошуком матеріалу серцевини волокна, що дозволяє розширити спектр люмінесценції. Так, останнім часом з'явився значний інтерес до ербієвих волокон на основі телуритного скла. Однак підсилювачі на основі телуритного волокна поки знаходяться на стадії лабораторних досліджень.

Важливою характеристикою підсилювача в системах зв'язку зі спектральним розділенням каналів (WDM) є рівномірність коефіцієнта посилення в межах робочого спектрального діапазону. Нерівномірність коефіцієнта посилення слабого сигналу може перевищувати 10 дБ в межах однієї спектральної смуги. У робочих умовах нерівномірність коефіцієнта посилення зменшується через підвищення сумарної потужності оптичного сигналу. Проте при проходженні в довгій лінії через ряд підсилювачів сумарна неоднорідність посилення може привести до втрати інформації в каналах з меншим посиленням. Таким чином, актуальним є

згладжування спектра підсилення. Для цього в схему підсилювача зазвичай вводяться спектрально селективні поглинаючі фільтри на основі як світловодних, так і об'ємних елементів. Одним з популярних видів фільтра є фотоіндукована довгоперіодна решітка (LPG, long-period grating). Такі решітки виготовляють шляхом просторово періодичного опромінення серцевини світловоду ультрафіолетовим випромінюванням через його поверхню. Решітка, період якої, як правило, лежить в діапазоні 0,1 - 1 мм, забезпечує резонансну взаємодію фундаментальної моди з модами оболонки. Наслідком такої взаємодії є перетворення частини енергії основної моди волоконного світловода з резонансною довжиною хвилі в енергію оболонкових мод і швидке загасання цих мод. Спектр і інтенсивність поглинання задаються періодом решітки і часом опромінення світловода. Застосування згладжуючих фільтрів, виготовлених з використанням цієї техніки, дозволяє зменшити варіації коефіцієнта посилення до десятих часток дБ в межах робочого діапазону.

## 4. РОЗРАХУНОК ВОЛЗ ЗА ТЕХНОЛОГІЄЮ «НІЧОГО В ЛІНІЇ»

### 4.1 Огляд інфраструктури ВОЛЗ в Україні

На сьогоднішній день в Україні є 3 найбільші компанії, що займаються прокладанням та продажем волоконно-оптичних ліній зв'язку (ВОЛЗ):

1. ТОВ «Атраком» - має 24 тис. км побудованих ВОЛЗ. Особливістю мережі є її прив'язка переважно до великих автомобільних шляхів, що є особливо цінним для операторів мобільного зв'язку (GSM, CDMA, 3G ...), а також для операторів передачі даних (наприклад, WiMAX), яким необхідно рівномірне покриття великих площ України.

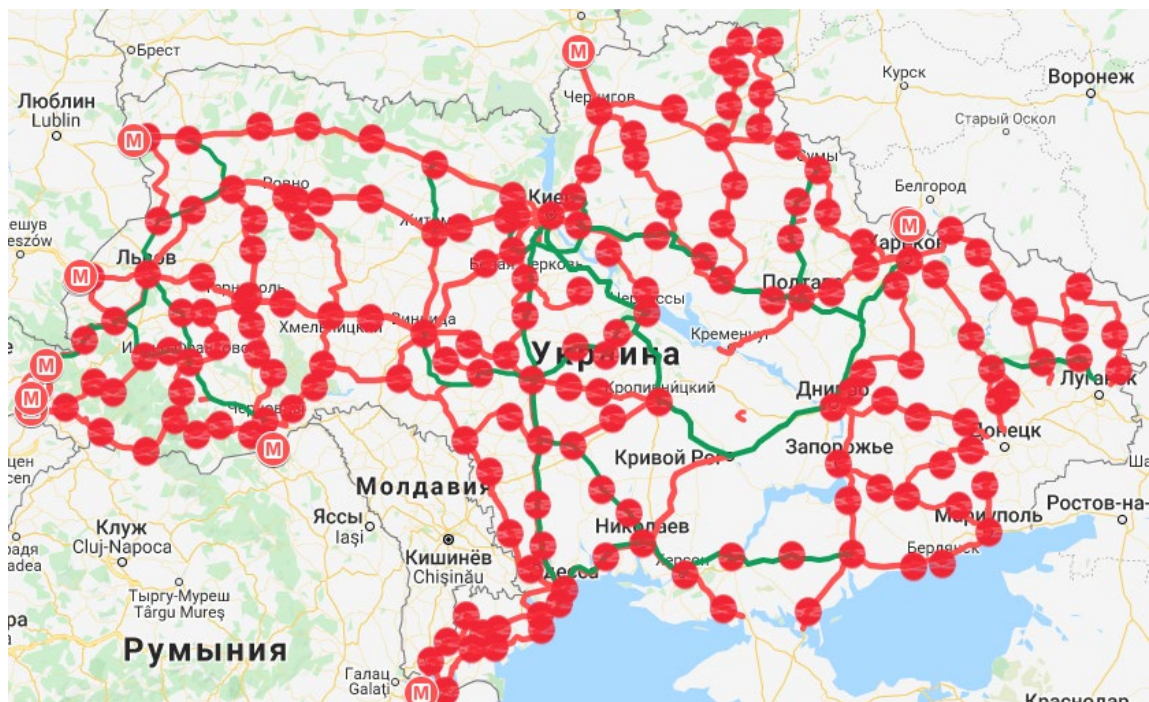


Рисунок 4.1 – Карта ВОЛЗ ТОВ «Атраком»[12]

2. ООО «Евротранстелеком» – має 6 тис. км побудованих ліній та продовжує будування. Основна задача компанії – забезпечити потреби залізничного транспорту України в сучасних засобах зв'язку і наданні телекомунікаційних послуг під власною торговою маркою.

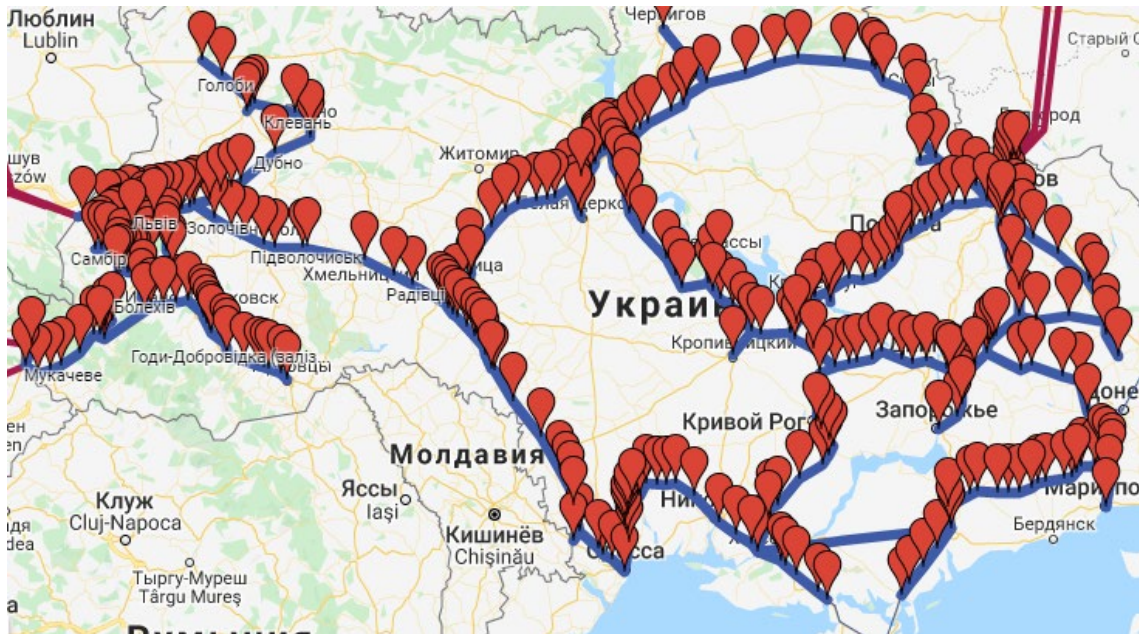


Рисунок 4.2 – Карта ВОЛЗ ООО «Евротранстелеком»[11]

3. ООО «Інтертелеком» – має 12 тис. км ВОЛЗ. Забезпечує можливості для надання послуг з організації та передачі в користування клієнтам виділених не комутованих цифрових каналів «точка – точка» і високошвидкісних каналів доступу в інтернет.

## 4.2 Огляд обладнання

На сьогоднішній день на ринку існує велика кількість компаній, що розробляють оптичні модулі, серед них найбільші: Cisco, D-link, A-Gear, GateRay, FiberTrade, HP, MikroTik, Juniper, Huawei.

Для нашої задачі підходять модулі форм-факторів SFP+, XFP. Вони мають найменшу чутливість та найбільшу потужність серед одноканальних модулів. Ознайомившись з продукцією та ціновою політикою цих компаній, я прийняв рішення обирати компанію GateRay.

Модуль GR-XF-X5580L-D виробництва GateRay — одномодовий оптичний модуль XFP, розроблений для мереж на основі двоволоконних оптичних кабелів, підключається до яких за допомогою двох роз'ємів LC. Передатчик даної моделі передбачає роботу на довжині хвилі 1550 нм і передає дані на швидкості до 10 Гбіт/с на відстань не більше 80 км. Модифікація GR-XF-X5580L-D передбачає наявність функцій DDM.

Digital Diagnostic Monitoring (DDM) - функція оптичного модуля, яка дозволяє контролювати в режимі реального часу такі параметри, як потужність вихідного сигналу (TX), рівень сигналу (RX), напругу живлення, температуру модуля і струм зміщення в ланцюзі передавача. Зміни даних параметрів дозволяють судити про стан оптичної системи і траси в цілому. Для нормальної роботи функція DDM повинна підтримуватися як оптичним модулем, так і комутатором.[10]

Ознайомившись з продукцією виробників оптичних підсилювачів, я прийняв рішення обирати підсилювачі компанії «ФайберТрейд». Вони пропонують бустери й передпідсилювачі з найкращими параметрами. Щоб забезпечити велику протяжність ВОЛЗ за технологією Nothing in line (NIL) необхідно обирати бустери з найбільшим



коефіцієнтом посилення та потужністю насичення, а передпідсилювачі з найнижчим рівнем потужності вхідного сигналу. Для даної роботи буде використовуватися бустер FT-AMP-B27-G30 з коефіцієнтом посилення 30дБ та потужністю насичення 27дБм. Передпідсилювач FT-AMP-P14-G13 має мінімальну вхідну потужність - 36дБм і коефіцієнт посилення 13дБ.[14]

#### 4.3 Розрахунок максимальної довжини ВОЛЗ

Для проектування в даній роботі було обрано маршрут Київ – Вінниця. Наявна ВОЛЗ прокладена вздовж залізничних шляхів, а на території міст через мережу телефонної кабельної каналізації (ТКК). Дана лінія прокладена компанією Атраком і складає 250 км.

На цій лінії використовується броньований кабель ОКЛБГ одеського кабельного заводу і має затухання 0.22дБ/км. З'єднувальні муфти встановлюються кожні 3км, тобто маємо приблизно 85 стиків. На кожному стику допускаються втрати потужності 0.05-0.1дБ.[13]

Розрахуємо максимальну довжину лінії з обраними параметрами компонентів ВОЛЗ:

Таблиця 4.1 – Обране обладнання

Назва	Характеристики
1. Бустер FT-AMP-B27-G30	Коефіцієнт посилення $K_1 = 30\text{дБ}$
2. Передпідсилювач FT-AMP-P14-G13	Коефіцієнт посилення $K_2 = 13\text{дБ}$
	Мінімальна вхідна потужність $P_{\min} = -36\text{дБм}$
3. Оптичний модуль GR-XF-X5580L-D	Чутливість детектора $P_d = -23\text{дБм}$
	Потужність випромінювача $P_v = 0 \dots +5\text{дБм}$
4. Кабель ОКЛБГ	Коефіцієнт загасання $Z = 0.22\text{дБ/км}$
	Довжина $L = 250\text{км}$

Допустиме затування в лінії може становити:

$$P_{\text{в}} - P_{\text{д}} = (5) - (-23) = 28 \text{ дБ.}$$

$$(28 \text{ дБ}) / (0.22 \text{ дБ/км}) = 127 \text{ км} - \text{відстань, на якій затування буде 28 дБ.}$$

Нам потрібно мінімум 250 км, і затування на такій довжині буде

$$250 \text{ км} * 0.22 \text{ дБ/км} = 55 \text{ дБ.}$$

Тобто, решту між 55 та 28 дБ = 27 дБ повинні покрити два підсилювачі - на вході і на виході лінії.

Після бустера сигнал повинен піднятися до:

$$P_{\text{в}} + K_1 = (+5 \text{ дБм}) + (30 \text{ дБ}) = 35 \text{ дБм;}$$

Передпідсилювач з вхідною потужністю  $P_{\text{min}} = -36 \text{ дБм}$  та коефіцієнтом посилення  $K_2 = 13 \text{ дБ}$ ;

На виході передпідсилювача має бути  $-23 \text{ дБм}$ ;

$$\text{Тоді } P_{\text{д}} = -36 \text{ дБм} + 13 \text{ дБ} = -23 \text{ дБм;}$$

Врахуємо втрати на стиках:  $P_{\text{втрат}} = 0.1 \text{ дБ} * 85 = 8.5 \text{ дБ}$ ;

Тоді баланс на лінії випромінювач - підсилювач1 - кабель - підсилювач2 –детектор:

$$L < (P_{\text{в}} - P_{\text{д}} + K_1 + K_2 + P_{\text{втрат}}) / Z$$

$$L < (5 + 23 + 30 + 13 - 8.5) / Z$$

$$L < 62.5 \text{ дБ} / 0.22 \text{ дБ/км}$$

$250 < 284 \text{ км}$  – це максимальна довжина, на яку ми можемо прокласти лінію з даними параметрами компонентів.

Як бачимо, дана лінія може функціонувати за технологією NIL з використанням обраних компонентів.

## РЕЗУЛЬТАТИ І ВИСНОВКИ

В ході виконання дипломної роботи було розглянуто характеристики та принцип роботи компонентів ВОЛЗ, зокрема DWDM-систем, оптичних модулів та підсилювачів EDFA, розраховано параметри ВОЛЗ типу NIL між населеними пунктами на відстані 250 км.

В першому розділі роботи було розглянуто стан виробництва EDFA підсилювачів та їх використання у ВОЛЗ, актуальність ВОЛЗ за технологією NIL на сьогодні і мета даної роботи. Наведені основні виробники підсилювачів EDFA та причини їх широкого використання. Були описані переваги цього виду зв'язку, зокрема за технологією NIL.

У другому розділі було описано принцип роботи оптичного волокна, розібрано види і типи волокон. Також виділено основні характеристики волокон та їх природу. Описані основні види ВОК, в залежності від умов експлуатації. Було розглянуто принцип роботи та будову WDM, DWDM систем та трансивера, а також його складових.

У третьому розділі було розглянуто різновиди підсилювачів EDFA в залежності від місця розташування в лінії. Детально описано принцип посилення світла в ербієвому підсилювачі. Були описані такі технічні характеристики, як: коефіцієнт посилення, вихідна потужність сигналу, енергетична ефективність накачування, шум-фактор, ширина смуги посилення. А також представлені формули для їх розрахунку. Розглянуто будову і оптичну схему ербієвого підсилювача.

В четвертому розділі було описано інфраструктуру ВОЛЗ в Україні. Проведено огляд та порівняльну характеристику обладнання, представленого на ринку та обрано відповідне для даної роботи. Для проектування ВОЛЗ за

технологією NIL було обрано існуючу трасу компанії Атраком та приведено характеристики волокна, що використовується. Проведено розрахунки максимальної довжини лінії з використанням обраного обладнання. Отриманий результат є задовільним для створення ВОЛЗ за технологією NIL. Все використане обладнання доступне на ринку України.

Отримана система може мати досить широкий спектр використання. Завдяки перевагам підсилювачів EDFA та використанню сучасних волокон можна створити ВОЛЗ за технологією NIL на великі відстані. Завдяки відсутності НРП не буде необхідності в додаткових витратах та зменшиться ризик несправності лінії. Масове використання технології NIL надасть можливість дешевше використовувати ВОЛЗ.

## ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ

1. Волоконная оптика: компоненты, системы передачи, измерения — М.: Компания Сайрус системс, 1999р. / Иванов А.Б.
2. Волоконно-оптические сети / Р.Р. Убайдулаев / М.: Эко-Трендз 2001г — 267с.
3. Оптические сети / Девід Грінфілд- К.: ООО «ТИД «ДС», 2002. – 256 с.
4. WDM и оптические сети связи / Эрбиевые волоконно-оптические усилители / Lightwawe Russian Edition №1 2003.
5. Андрэ Жирар. Руководство по технологии и тестированию систем WDM. – М.: EXFO, 2001.
6. Офіційний сайт Инкаб [Електронний ресурс] – Режим доступу: <https://incab.ru/optical-cable/>.
7. Офіційний сайт ВОЛС.Эксперт [Електронний ресурс] – Режим доступу: <https://vols.expert/>.
8. IEC 60793-2 (2003), Optical fibres – Part 2: Product specifications.
9. Офіційний сайт SKEO [Електронний ресурс] – Режим доступу: <https://skeo.ru/technology/data-transmission/opticheskie-moduli-part-1-peredatchiki>
10. Офіційний сайт Fibertool [Електронний ресурс] – Режим доступу: [https://fibertool.ru/catalog/active/gateray\\_s\\_ddm\\_1/gr\\_xf\\_x5580l\\_d/](https://fibertool.ru/catalog/active/gateray_s_ddm_1/gr_xf_x5580l_d/).
11. Офіційний сайт Eurotranstelecom [Електронний ресурс] – Режим доступу: <https://9www.ett.ua/ru>.

12. Офіційний сайт Atracom [Електронний ресурс] – Режим доступу:  
<https://www.atracom.com.ua/ru/about-us/>.
13. Компанія Атраком / Приватне повідомлення.
14. Офіційний сайт Fibertrade [Електронний ресурс] – Режим доступу:  
[https://fibertrade.ru/category/61\\_usiliteli](https://fibertrade.ru/category/61_usiliteli).